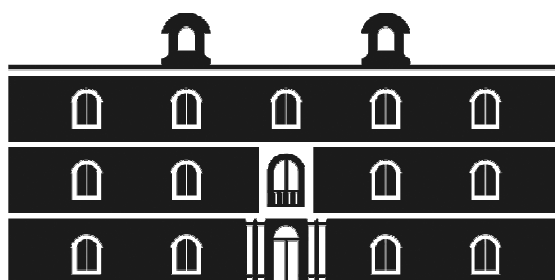




**Universidad
Politécnica
de Cartagena**



industriales
etsii UPCT

Estudio de la rugosidad superficial y la orientación de la fibra de piezas inyectadas de PBT reforzado con 50% de fibra de vidrio y desgaste del molde de acero de la máquina de inyección

**Titulación:
Alumno:
Directores:**

**Ingeniería Industrial
Rubén Izquierdo Rivera
Isidoro J. Martínez Mateo
Francisco J. Carrión Vilches**

Cartagena, 15 de junio de 2013

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quisiera agradecerle a Isidoro J. Martínez Mateo, director de este proyecto, el haberme dado la oportunidad de realizarlo y su constante guía, así como a todo el Departamento de Ingeniería de Materiales y Fabricación, en especial a Francisco J. Carrión Vilches por su inestimable ayuda.

A mis padres y toda mi familia por su paciencia y sus incesantes consejos.

A todos mis profesores, por todo lo que me han enseñado a lo largo de todos estos años.

A mis amigos y compañeros de la universidad, que siempre han sabido ayudarme y apoyarme y de los que tanto he aprendido.

Gracias.

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS	Pág. 5
ÍNDICE DE FIGURAS	Pág. 6
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	Pág. 8
1. Polímeros	Pág. 9
1.1. Definición	Pág. 9
1.2. Temperatura de transición vítrea	Pág. 11
1.3. Polímeros amorfos y polímeros cristalinos	Pág. 12
1.4. Clasificación de los polímeros según su comportamiento al elevar su temperatura	Pág. 15
1.5. Procesamiento de plásticos	Pág. 16
1.6. Propiedades de los polímeros plásticos	Pág. 19
2. Materiales reforzados con fibras	Pág. 22
2.1. Fibra de vidrio	Pág. 23
2.2. Fibra de carbono	Pág. 26
2.3. Fibras orgánicas	Pág. 27
2.4. Otros tipos de fibras	Pág. 27
3. Moldeo por inyección	Pág. 28
3.1. Introducción	Pág. 28
3.2. Tipos de máquinas de inyección	Pág. 31
3.3. Control de presión, temperatura y tiempo	Pág. 39
3.4. Variantes del proceso de moldeo por inyección	Pág. 41
3.5. Algunos aspectos de la calidad del producto	Pág. 46
3.6. Problemas en el moldeo por inyección	Pág. 63
4. Aceros para moldes de inyección	Pág. 65
4.1. Factores que influyen en la elección del material del molde	Pág. 65
4.2. Aceros aleados	Pág. 66
4.3. Aceros de herramientas	Pág. 67
4.4. Tratamientos térmicos de los aceros de herramientas	Pág. 70

CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS EXPERIMENTALES	Pág. 73
1. Ultradur	Pág. 74
1.1. Ultradur en la industria	Pág. 74
1.2. Las propiedades de Ultradur	Pág. 75
1.3. Ultradur B4300 G10	Pág. 76
1.4. Tablas Ultradur B4300 G10	Pág. 78
1.5. Gráficas Ultradur B4300 G10	Pág. 79
2. Placas del molde de inyección	Pág. 81
2.1. Material	Pág. 81
2.2. Dimensiones	Pág. 85
2.3. Sujeción al molde	Pág. 86
3. Máquina inyectora	Pág. 87
3.1. Unidad de cierre	Pág. 88
3.2. Unidad de inyección	Pág. 89
3.3. Unidad hidráulica	Pág. 89
3.4. Unidad eléctrica y de seguridad	Pág. 90
3.5. Unidad de control C4000v2.3	Pág. 90
4. Microscopio electrónico de barrido	Pág. 92
5. Metalizado por plasma	Pág. 95
6. Perfilómetro óptico	Pág. 96
7. Otra instrumentación	Pág. 99
7.1. Horno de secado	Pág. 99
7.2. Cortadora de precisión	Pág. 99
8. Procedimiento experimental	Pág. 100
CAPÍTULO III. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	Pág. 106
1. Introducción	Pág. 107
2. Desgaste del molde de acero	Pág. 107
2.1. Placa A	Pág. 108
2.2. Placa B	Pág. 111
2.3. Comparación de placas y caras	Pág. 114
3. Rugosidad superficial en las probetas	Pág. 114
4. Orientación de las fibras en las muestras	Pág. 117
CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES	Pág. 124
CAPÍTULO V. BIBLIOGRAFÍA	Pág. 126

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valor de Tg en polímeros comunes
Tabla 2. Propiedades de los distintos tipos de fibra de vidrio
Tabla 3. Propiedades de las fibras de carbono
Tabla 4. Efecto del molde y las variables de procesado sobre la orientación y la anisotropía
Tabla 5. Efecto de la orientación sobre algunas propiedades
Tabla 6. Algunos valores aproximados de la contracción
Tabla 7. Condiciones que afectan a la contracción
Tabla 8. Factores que influyen en el alabeamiento
Tabla 9. Propiedades del moldeo por inyección
Tabla 10. Características de la familia Ultradur
Tabla 11. Principales propiedades de Ultradur B4300 G10
Tabla 12. Propiedades mecánicas de Ultradur B4300 G10
Tabla 13. Composición química (valores aproximados en %) del acero 1.2343
Tabla 14. Normas del acero 1.2343
Tabla 15. Propiedades físicas y mecánicas del acero 1.2343
Tabla 16. Características generales de la inyectora
Tabla 17. Características del grupo de cierre de la inyectora
Tabla 18. Características de la unidad de inyección
Tabla 19. Características técnicas del perfilómetro óptico
Tabla 20. Valores comparativos de la composición química del acero
Tabla 21. Características de la máquina inyectora en el proceso de inyección
Tabla 22. Parámetros de amplitud-altura y perfil de rugosidad (μm) placa A
Tabla 23. Parámetros de amplitud-altura y perfil de rugosidad (μm) placa B
Tabla 24. Rugosidad (μm) placas A y B
Tabla 25. Rugosidad (μm) probetas Ultradur G10 (50% fibra de vidrio)

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1. Monómero
- Figura 2. Polímero
- Figura 3. A la izquierda material cristalino y a la derecha material amorfo
- Figura 4. Estructura de un polímero amorfo
- Figura 5. Formación de estructuras cristalinas
- Figura 6. Diagrama esfuerzo - deformación de un material sólido - elástico
- Figura 7. Representación del comportamiento pseudoplástico de un polímero fundido
- Figura 8. Clasificación de los PRF
- Figura 9. Manejo de fibra de vidrio
- Figura 10. Partes fundamentales de una máquina inyectora
- Figura 11. Esquema de máquina de moldeo por inyección
- Figura 12. Máquina de inyección de tipo émbolo
- Figura 13. Máquina de inyección de tipo émbolo con sistema de pre-plastificado
- Figura 14. Máquina de inyección de tipo tornillo recíproco
- Figura 15. Ciclo típico de una máquina de tornillo recíproco
- Figura 16. Posiciones de la válvula de retención
- Figura 17. Tipos de boquilla: (a)abierta, (b)de interrupción mecánica simple, (c)válvula de agua
- Figura 18. Sistema de cierre mecánico
- Figura 19. Sistema de cierre hidráulico
- Figura 20. Presión que actúa sobre el brazo en función del tiempo durante el llenado del molde y la compactación.
- Figura 21. Posición del brazo y presión en el molde en función del tiempo durante el llenado del molde y la compactación
- Figura 22. Máquinas de inyección para la fabricación de espumas estructurales
- Figura 23. Etapas del proceso de moldeo por inyección de una estructura tipo sándwich
- Figura 24. Moldeo con inyección de gas de una manilla de automóvil
- Figura 25. Representación esquemática del proceso SCORIM
- Figura 26. El uso de costillas en vez de una sección sólida
- Figura 27. Características de diseño para evitar los efectos de las esquinas agudas
- Figura 28. Orientación de cadenas durante el flujo de polímeros
- Figura 29. Anisotropía provocada por la orientación de cadenas
- Figura 30. Gradiente de orientación en una pieza moldeada
- Figura 31. Patrón de orientación de una pieza moldeada
- Figura 32. Efectos de la orientación en el frente de fusión
- Figura 33. Efectos de las variables de inyección sobre la orientación
- Figura 34. Contracción diferencial como causa de alabamiento de una pieza moldeada circular
- Figura 35. Efecto de las variables de inyección sobre la contracción

- Figura 36. Efectos de las condiciones de tratamiento sobre la contracción
- Figura 37. Gráfico relación % carburos, dureza y desgaste
- Figura 38. Ultradur en un reposacabezas de automóvil
- Figura 39. Bolsa 25 kg. Ultradur B4300 G10
- Figura 40. Gráfica de velocidad de cizallamiento frente viscosidad
- Figura 41. Gráfica de temperatura frente Módulo de Young
- Figura 42. Gráfica de esfuerzo frente el alargamiento
- Figura 43. Gráfica de índice de viscosidad frente a tiempo de residencia
- Figura 44. Diagrama de revenido
- Figura 45. Esquema de tratamiento térmico
- Figura 46. Placa de acero del molde de inyección A
- Figura 47. Esquema acotado de la placa del molde de inyección
- Figura 48. Esquema sujeción de las dos placas al molde de inyección
- Figura 49. Máquina de inyección DEU 250 H55 mini VP
- Figura 50. Panel de control máquina de inyección
- Figura 51. Interacción electrón - material
- Figura 52. Microscopio electrónico de barrido
- Figura 53. Metalizador de plasma
- Figura 54. Perfilómetro de contacto no focal
- Figura 55. Horno de secado
- Figura 56. Cortadora de precisión
- Figura 57. Pared del molde de acero
- Figura 58. Designación de las caras de las placas A y B
- Figura 59. Muestras obtenidas
- Figura 60. Dimensiones de las muestras de PBT obtenidas en la inyección
- Figura 61. Muestras cortadas para obtención de probetas A, B, C y D
- Figura 62. Gráfico variación de la rugosidad placa A
- Figura 63. Topografía de la Cara I de la placa A antes de inyectar
- Figura 64. Topografía de la Cara I de la placa A después de inyectar
- Figura 65. Micrografía SEM de la placa A (cara I; vista frontal)
- Figura 66. Micrografía SEM de la placa A (cara IV; vista frontal)
- Figura 67. Gráfico variación de la rugosidad placa B
- Figura 68. Micrografía SEM de la placa B (cara I; vista frontal)
- Figura 69. Micrografía SEM de las cuatro probetas de Ultradur G10
- Figura 70. Dirección de inyección del flujo en la muestra 1.000-B de Ultradur G10
- Figura 71. Vista superior de micrografías SEM de los cantos de la muestra 1.000-B
- Figura 72. Micrografía SEM de la muestra 1.000-B (cara II; vista superior)
- Figura 73. Micrografía SEM de la probeta A de Ultradur G10 (cara I; vista frontal)
- Figura 74. Mapa elemental de Si de la probeta A de Ultradur G10
- Figura 75. Micrografía SEM de la muestra 1.000-B de Ultradur G10 (caras II-III; vista superior)
- Figura 76. Micrografía SEM de la muestra 1.000-B (cara III; vista superior)
- Figura 77. Micrografía SEM de la probeta B de Ultradur G10 (cara IV; vista frontal)
- Figura 78. Mapa elemental de Si de la probeta B de Ultradur G10
- Figura 79. Fibras de vidrio dentro del Ultradur G10

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1. Polímeros
2. Materiales reforzados con fibras
3. Moldeo por inyección
4. Aceros para moldes de inyección

1. Polímeros

1.1. Definición

El desarrollo de la industria de los polímeros en la segunda mitad del siglo XX, ha sido muy importante y muestra signos de crecimiento constante para las próximas décadas. Actualmente, los polímeros son materiales de gran relevancia en nuestras sociedades modernas. Esta importancia se hace presente en numerosos ámbitos de nuestra vida cotidiana, y los encontramos en nuestros hogares, electrodomésticos, automóviles, y en aplicaciones con características muy exigentes como en el sector aeroespacial.

Los polímeros son materiales que están constituidos por gran cantidad de cadenas que se repiten, dando lugar a moléculas de alto peso molecular, denominadas también como macromoléculas. Estas macromoléculas son responsables de que los materiales presenten propiedades únicas y diferenciadas del resto de materiales comunes como son los metales y las cerámicas.

Entre las principales ventajas que presentan podemos destacar:

- Bajos costes de producción
- Baja densidad
- Posibilidad de obtener piezas de geometría compleja
- Capacidad de modificación de propiedades mediante aditivos
- Baja temperatura de procesado
- Buenos aislantes térmicos y eléctricos

Por otro lado las principales limitaciones son:

- Bajas temperaturas de servicio
- Inflamabilidad
- Baja resistencia a la deformación por fluencia
- Poco resistentes a la abrasión y al desgaste
- Sufren degradación debida a la radiación ultravioleta

El crecimiento de la industria del plástico ha ido acompañado de un desarrollo espectacular en el campo de los aditivos. Estos compuestos que son añadidos a casi todos los polímeros, mejoran y modifican las propiedades intrínsecas de los materiales poliméricos. Seguramente los aditivos más llamativos son las tintas y colorantes, pudiendo encontrar una gran cantidad de aditivos que se utilizan en este campo tan amplio como son:

- Estabilizantes. Protegen al polímero de los efectos degradantes del calor, oxígeno, luz, etc.
- Plastificantes. Dan flexibilidad al plástico
- Lubricantes. Facilitan el flujo del plástico en el moldeo
- Cargas reforzantes. Mejoran las características mecánicas (talco, carbonatos, esferas, fibras de vidrio, etc.)
- Colorantes. Pigmentos y aditivos para colorear el plástico
- Otros. Antiestáticos, espumantes, ignifugantes, fungicidas, etc.

Un polímero es en sí una molécula gigante. La palabra es de origen griego, **poly**: muchos y **mero**: parte, segmento.

Al ser los polímeros en su mayoría materiales sintéticos, su obtención es derivada de la reacción química de determinadas sustancias. Estas sustancias deben contener moléculas que al unirse den como resultado una macromolécula, por lo que estas moléculas poseen una configuración muy similar a la presentada por la unidad estructural del polímero.

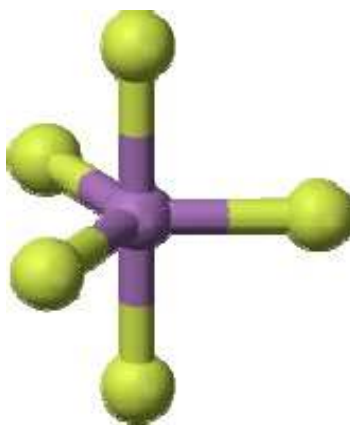


Figura 1. Monómero

Al reaccionar los químicos precursores o monómeros en el proceso de polimerización, las moléculas originales modifican ligeramente su configuración, por medio de la apertura de un doble enlace o de la pérdida de un hidrógeno o radical, lo que permite que se unan en forma secuencial, formando eslabones a lo largo de la macromolécula formada, creando de esta forma una cadena de unidades estructurales o cadena polimérica. De las configuraciones geométricas de esta cadena, dependerá la cristalinidad del material.

Los polímeros son mezclas de macromoléculas de distintos pesos moleculares. Por lo tanto no son especies químicas puras y tampoco tienen un punto de fusión definido.

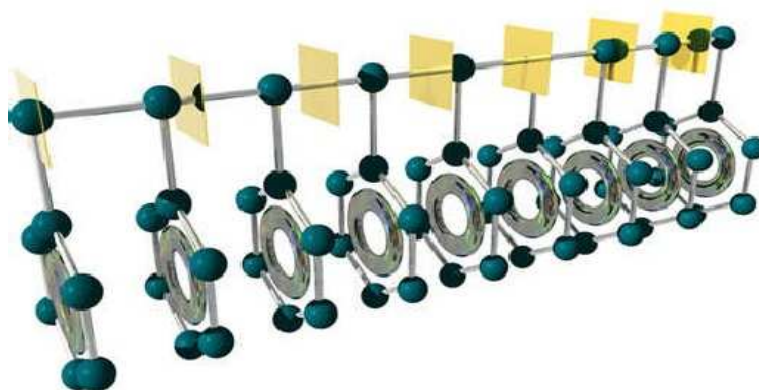


Figura 2. Polímero

Cada una de las especies que forman a un polímero tiene un peso molecular determinado y por lo tanto, para caracterizar una muestra de polímero se busca caracterizar la distribución de pesos moleculares de las moléculas de las especies que lo conforman.

Se define polimerización como la unión de pequeñas moléculas (monómeros) para formar moléculas mayores (polímeros). El grado de polimerización nos refiere a la longitud de una cadena por medio de la cantidad de unidades estructurales que la conforman. Esta longitud está determinada por la posición de moléculas que pueden ser adheridas a la cadena polimérica y la capacidad de esta a crecer al momento de la reacción.

1.2. Temperatura de transición vítrea

La Temperatura de transición vítrea (T_g) es la temperatura a la que se da una pseudotransición termodinámica en materiales vítreos.

A temperaturas altas, los polímeros se vuelven líquidos muy viscosos en los que las cadenas están constantemente en movimiento cambiando su forma y deslizándose unas sobre las otras. A temperaturas muy bajas, el mismo polímero sería un sólido duro, rígido y frágil.

El estudio de T_g es más complejo en el caso de polímeros que en de cualquier otro material de moléculas pequeñas. Por encima de la T_g los enlaces secundarios de las moléculas son mucho más débiles que el movimiento térmico de las mismas, por ello el polímero se torna gomoso y adquiere cierta elasticidad y capacidad de deformación plástica sin fractura. Este comportamiento es específico de polímeros termoplásticos.

Todos los polímeros termoplásticos presentan una T_g , ya sean estos amorfos o semicristalinos. Los polímeros amorfos al calentarse presentan solamente una transición, la T_g . Los polímeros semicristalinos presentan dos, la T_g y la temperatura de fusión de los cristales (T_m).

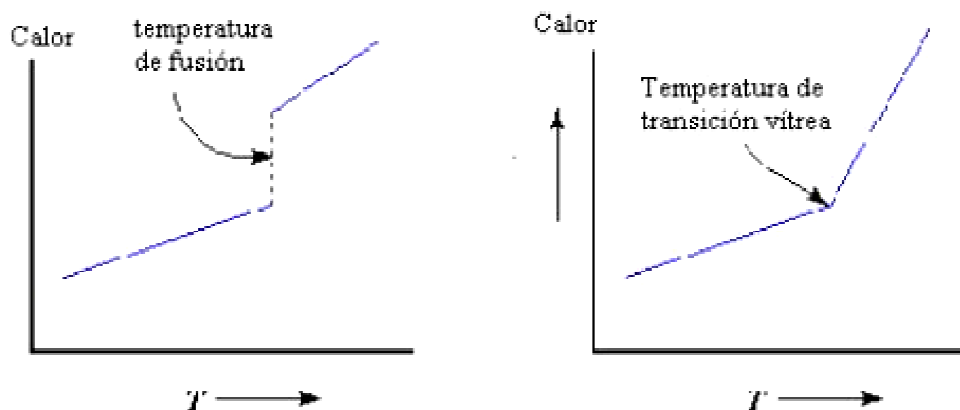


Figura 3. A la izquierda material cristalino y a la derecha material amorfo

Tg es un valor de extrema importancia en ingeniería de polímeros, pues indica la temperatura de trabajo del plástico y por ende determina si un plástico concreto puede ser utilizado para una aplicación dada.

Tabla 1. Valor de Tg en polímeros comunes

POLÍMERO	Tg (°C)	Tm (°C)
ABS	110	190
Poliacetal	-85	175
Nylon 6	50	225
Poliacrilonitrilo	87	320
Policarbonato	152	225
Policloruro de vinilo	80	205
Poliestireno táctico	100	235
Poliéter	-	235
Polipropileno	-15 a -25	160

1.3. Polímeros amorfos y polímeros cristalinos

En el estado sólido se incluyen los polímeros amorfos y cristalinos. En este estado es donde se encuentran los polímeros tal y como se conocen, ya sea como plásticos, elastómeros, fibras, adhesivos o recubrimientos.

Polímeros amorfos

El estado amorfo está presente en todos los plásticos, ya que aún en los polímeros llamados cristalinos se tienen porciones de material amorfo, por lo que en realidad son materiales semicristalinos. Por otro lado, cuando un polímero semicristalino se funde, el fundido es amorfo.

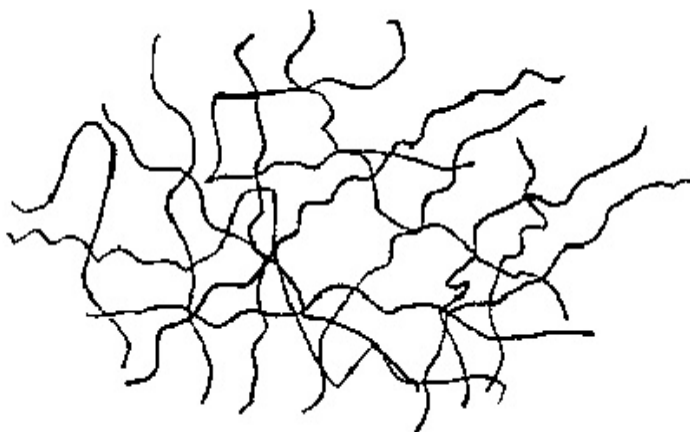


Figura 4. Estructura de un polímero amorfo

Como un comportamiento característico de los polímeros amorfos, se tiene que a bajas temperaturas estos polímeros son vidriosos, duros y frágiles. Al elevarse la temperatura se presenta una transición en la cual el material pasa del comportamiento del tipo vidrio a uno tipo goma. Esto ocurre cuando se alcanza la temperatura de transición vítrea (T_g). Cuando se supera T_g , los polímeros amorfos entrecruzados presentan un comportamiento elástico gomoso (de hule).

La existencia de polímeros puramente amorfos se debe en parte a irregularidades en la estructura de la cadena que impiden la cristalización. De esta forma, cadenas poco simétricas o con un elevado número de ramificaciones, tendrán como consecuencia que el polímero resultante no pueda cristalizar.

Cuando las cadenas poliméricas de un material no logran ordenarse, el volumen que ocuparán será mayor, en consecuencia, la densidad del plástico disminuirá, siendo entre 0,85 y 0,95 de la densidad del polímero cristalino.

Una de las principales características de los polímeros cristalinos es la ausencia de un patrón de difracción de rayos X, así como la carencia de una transición de primer orden.

El movimiento de las cadenas poliméricas dentro del estado amorfo define muchas de las propiedades mecánicas del material, incluyendo su capacidad para cristalizar. De esta forma, las moléculas pequeñas se mueven principalmente por traslación, en especial cuando se trata de polímero fundido, aunque sus trayectorias son más bien pequeñas.

Polímeros cristalinos

Al contrario de la fase amorfa, la fase cristalina de los polímeros presenta cierto orden, reflejado en el hecho que posee un cierto patrón de difracción de rayos X, además de presentar una transición de primer orden en el fundido.

Esta transición de primer orden se caracteriza por una discontinuidad en la curva Volumen-Temperatura, lo que implica la existencia de una entalpía de transformación ΔH_f . Otra transición que cobra relevancia es la temperatura de transición vítrea, la cual es de segundo orden y solo se percibe en un cambio del calor específico.

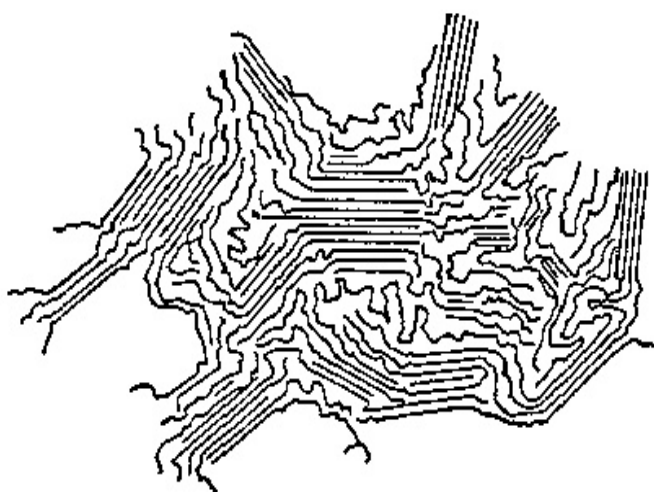


Figura 5. Formación de estructuras cristalinas

Aún cuando un polímero cristalice, este siempre tendrá una fracción importante de material amorfo. Esto hace siempre que la temperatura de fusión T_f siempre sea mayor que la temperatura de transición vítrea T_g . Esta presencia de una fracción amorfa permite que los polímeros semicristalinos presenten un comportamiento duro y rígido bajo de T_g pero relativamente flexible entre T_g y T_f .

La existencia de cristales en un polímero depende en gran parte de la tacticidad de la cadena y la regularidad de la misma. En el caso de los polímeros isotácticos y sindiotácticos se tiene por lo regular un cierto grado de cristalinidad. En contraste, salvo algunas excepciones donde los grupos funcionales son muy pequeños, los polímeros atácticos no serán cristalinos.

A diferencia de los materiales cerámicos y metálicos, las celdas unitarias de las estructuras cristalinas en los polímeros no contienen moléculas, sino unidades estructurales. Esto permite explicar el hecho de que los patrones de difracción de los rayos X reflejan un tamaño de celda unitaria similar a la de otros materiales, pese a estar conformado por macromoléculas.

1.4. Clasificación de los polímeros según su comportamiento al elevar su temperatura

Para clasificar polímeros, una de las formas empíricas más sencillas consiste en calentarlos por encima de cierta temperatura. Se diferencian dos tipos de polímeros según si el material funde y fluye o por el contrario no lo hace:

- **Termoplásticos**

Un termoplástico es un plástico que, a temperaturas relativamente altas, se vuelve plástico, deformable o flexible, se derrite cuando se calienta y se endurece en un estado de transición vítrea cuando se enfría lo suficiente. La mayor parte de los termoplásticos son polímeros de alto peso molecular, los cuales poseen cadenas asociadas por medio de fuerzas de Van der Waals débiles, fuertes interacciones dipolo-dipolo y enlace de hidrógeno, o incluso anillos aromáticos apilados.

Sus propiedades físicas cambian gradualmente si se funden y se moldean varias veces (historial térmico), generalmente disminuyendo estas propiedades al debilitar los enlaces.

Los más usados son: el polietileno (PE), el polipropileno (PP), el polibutileno (PB), el poliestireno (PS), el polimetilmetacrilato (PMMA), el policloruro de vinilo (PVC), y el nylon. Muchos de los termoplásticos conocidos pueden ser resultado de la suma de varios polímeros, como es el caso del vinilo, que es una mezcla de polietileno y polipropileno.

- **Termoestables**

Los polímeros termoestables son polímeros infusibles e insolubles. La razón de tal comportamiento estriba en que las cadenas de estos materiales forman una red tridimensional espacial, entrelazándose con fuertes enlaces covalentes. La estructura así formada es un conglomerado de cadenas entrelazadas dando la apariencia y funcionando como una macromolécula, que al elevarse la temperatura de esta, simplemente las cadenas se compactan mas haciendo al polímero más resistente hasta el punto en que se degrada.

El proceso de polimerización se suele dar en dos etapas: en la primera se produce la polimerización parcial, formando cadenas lineales mientras que en la segunda el proceso se completa entrelazando las moléculas aplicando calor y presión durante el conformado. También pueden obtenerse plásticos termoestables a partir de dos resinas líquidas, produciéndose la reacción de entrelazamiento de las cadenas al ser mezcladas.

La reacción de curado es irreversible, de forma que el plástico resultante no puede ser reciclado, ya que si se incrementa la temperatura el polímero no funde, sino que alcanza su temperatura de degradación.

Los plásticos termoestables poseen algunas propiedades ventajosas respecto a los termoplásticos. Por ejemplo, mejor resistencia al impacto, a los solventes, a la permeación de gases y a las temperaturas extremas. Entre las desventajas se encuentran, generalmente, la dificultad de procesamiento, la necesidad del curado, el carácter quebradizo del material (frágil) y el no presentar reforzamiento al someterlo a tensión.

La clasificación termoplásticos / termoestables es independiente de la clasificación elastómeros / plásticos / fibras. Existen plásticos que presentan un comportamiento termoplástico y otros que se comportan como termoestables. Esto constituye de hecho la principal subdivisión del grupo de los plásticos y hace que a menudo cuando se habla de “los termoestables” en realidad se haga referencia sólo a “los plásticos termoestables”. Pero ello no debe hacer olvidar que los elastómeros también se dividen en termoestables (la gran mayoría) y termoplásticos (una minoría pero con aplicaciones muy interesantes).

1.5. Procesamiento de plásticos

Podemos distinguir tres etapas en la producción de plásticos:

- **Formulación de las resinas**, partiendo del petróleo o el carbón mediante reacciones químicas de adición o condensación se obtienen polvos, gránulos, líquidos, escamas, láminas, tubos y formas estructurales.
- **Procesamiento de plásticos.**
- **Fabricación o acabado**, utilizando un procesamiento secundario se obtienen piezas acabadas. Estas actividades son por ejemplo ensamble, unión, maquinado y soldadura.

Existe un gran número de técnicas de procesamiento de plásticos, donde aquí se mencionarán las más importantes, centrándonos más adelante en el moldeo por inyección.

1.5.1. Moldeo por compresión

Es el método más usado para producciones unitarias y pequeñas series. Este procedimiento es indicado para moldear polímeros termoestables, que se obtiene en forma de polvo o granulado, para lo cual el molde previamente elaborado según la pieza a conformar, por lo general en macho y hembra, se calienta, se le aplica el desmoldante y se deposita en ella la cantidad precisa de resina. Tras cerrar el molde la resina se distribuye en su interior, se aplica calor y presión a valores de 140 - 170°C y 100 Bar o más. El calor y la presión conforman el plástico en toda su extensión.

1.5.2. Moldeo por transferencia

El moldeo por transferencia, al igual que el método anterior también se utiliza para el moldeo de polímeros termoestables y en algunos casos los termoplásticos.

La diferencia entre el moldeado por prensa y el de transferencia es que el calor y la presión necesaria para la polimerización (para fundir) de la resina se realiza en una cámara de caldeo y compresión, en ella previamente calentada se aplica el desmoldante y una determinada cantidad de resina en forma de polvo o en forma granulada. Cuando la resina se hace plástica, se transfiere al molde propiamente dicho mediante un émbolo en la cámara de caldeo. Por medio de bebederos o canales de transferencia, después de curado el plástico se abre el molde y se extrae la pieza.

1.5.3. Moldeo por inyección

Se utiliza principalmente para los termoplásticos, aunque se puede utilizar para algunos termoestables. El material en forma de gránulos o polvo se calienta en una cámara de inyección y se conforma a presión con un émbolo reciprocante o un tornillo sinfín. El material semilíquido se inyecta en la cavidad de un molde, para producir la pieza de la forma deseada. La forma de la pieza la produce la cavidad del molde o troquel.

Un émbolo o pistón de inyección se mueve rápidamente hacia adelante y hacia atrás para empujar el plástico ablandado por el calor a través del espacio existente entre las paredes del cilindro y una pieza recalentada y situada en el centro de aquél. Esta pieza central se emplea, dada la pequeña conductividad térmica de los plásticos, de forma que la superficie de calefacción del cilindro es grande y el espesor de la capa plástica calentada es pequeño. Bajo la acción combinada del calor y la presión ejercida por el pistón de inyección, el polímero es lo bastante fluido como para llegar al molde frío donde toma forma la pieza en cuestión. El polímero estará lo suficiente fluido como para llenar el molde frío. Pasado un tiempo breve dentro del molde cerrado, el plástico solidifica, el molde se abre y la pieza es removida. El ritmo de producción es muy rápido, de escasos segundos.

1.5.4. Extrusión

Se usa principalmente para termoplásticos. La extrusión es el mismo proceso básico que el moldeado por inyección, la diferencia es que en la extrusión la configuración de la pieza se genera con el troquel de extrusión y no con el molde como en el moldeado por inyección.

En la extrusión el material plástico, por lo general en forma de polvo o granulado, se almacena en una tolva y luego se alimenta una larga cámara de calefacción, a través de la cual se mueve el material por acción de un tornillo sin fin.

Al final de la cámara de calefacción el plástico fundido es forzado a salir en forma continua y a presión a través de un troquel de extrusión preformado, la configuración transversal del troquel determina la forma de la pieza. A medida que el plástico extruido pasa por el troquel, alimenta una correa transportadora, en la cual se enfría, generalmente por ventiladores o por inmersión en agua, con éste procedimiento se producen piezas como tubos, varillas, láminas, películas y cordones.

1.5.5. Moldeo por soplado

Es un procedimiento para moldeo de termoplásticos únicamente, para ello, mediante una extrusora en forma horizontal o vertical se producen dos bandas o preformas calientes en estado pastoso, de un espesor determinado y además inflable, que se introducen al interior del molde partido, posteriormente se cierra el molde y mediante un mandril se introduce aire a alta presión entre las dos láminas, ésta presión hace que las láminas de plástico se adhieran a las paredes interiores del molde haciendo que tomen su configuración, seguidamente se enfría el molde para que las películas se endurezcan, pasado esto se procede a extraer la pieza y se elimina el material excedente (rebaba).

1.5.6. Otros procesamientos

- **Calandrado.** Se utiliza para revestir materiales textiles, papel, cartón o planchas metálicas y para producir hojas o películas de termoplástico de hasta 10 milésimas de pulgada de espesor y láminas con espesores superiores.

En el calandrado de películas y láminas el compuesto plástico se pasa a través de tres o cuatro rodillos giratorios y con caldeo, los cuales estrechan el material en forma de láminas o películas. El espesor final del producto se determina por medio del espacio entre rodillos.

- **Termoformado.** Sobre moldes hembra se emplaza una plancha de materiales termoplásticos, fijada de modo que el hueco entre molde y pieza sea estanco. Se calienta hasta su temperatura de reblandecimiento y se hace el vacío en dicho hueco, de modo que el material se estire y se adapte a la superficie del molde. Una vez fría la pieza, se extrae, se recorta el material en exceso y se obtiene una pieza acabada.
- **Colado.** En el conformado de polímeros, la fundición o colado del plástico implica vaciar una resina líquida en un molde usando la fuerza de gravedad para llenar la cavidad dejando que el polímero endurezca. Tanto los termoplásticos como los termofijos se funden.
- **Hilado.** Se utiliza para termoplásticos principalmente. Se producen filamentos y fibras; podemos decir que es un caso particular de la extrusión.

El polímero es forzado a pasar a través de una boquilla o dado que contiene muchos pequeños agujeros. El dado, llamado hilador, puede girar y producir una fibra o cordón.

- **Moldeo rotacional.** Este es un proceso para hacer piezas huecas, se introducen en un molde metálico los gránulos del plástico termoplástico, se calienta y se pone a girar el molde. Los gránulos de plástico se funden cuando entran en contacto con las paredes del molde y forman una capa que reproduce la parte interior del molde.

1.6. Propiedades de los polímeros plásticos

Los polímeros termoplásticos son aquellos polímeros que, ante un esfuerzo suficientemente intenso, se deforman irreversiblemente, no pudiendo volver a su forma original. Son materiales ligeros resistentes a la corrosión de baja resistencia y rigidez y no son adecuados para uso a temperaturas altas.

Comportamiento elástico

En los polímeros termoplásticos la deformación elástica es el resultado de dos mecanismos. Un esfuerzo aplicado hace que se estiren y distorsionen los enlaces covalentes de las cadenas, permitiendo que estas se alarguen elásticamente. Al eliminar el esfuerzo se recuperan de esta distorsión prácticamente de manera instantánea.

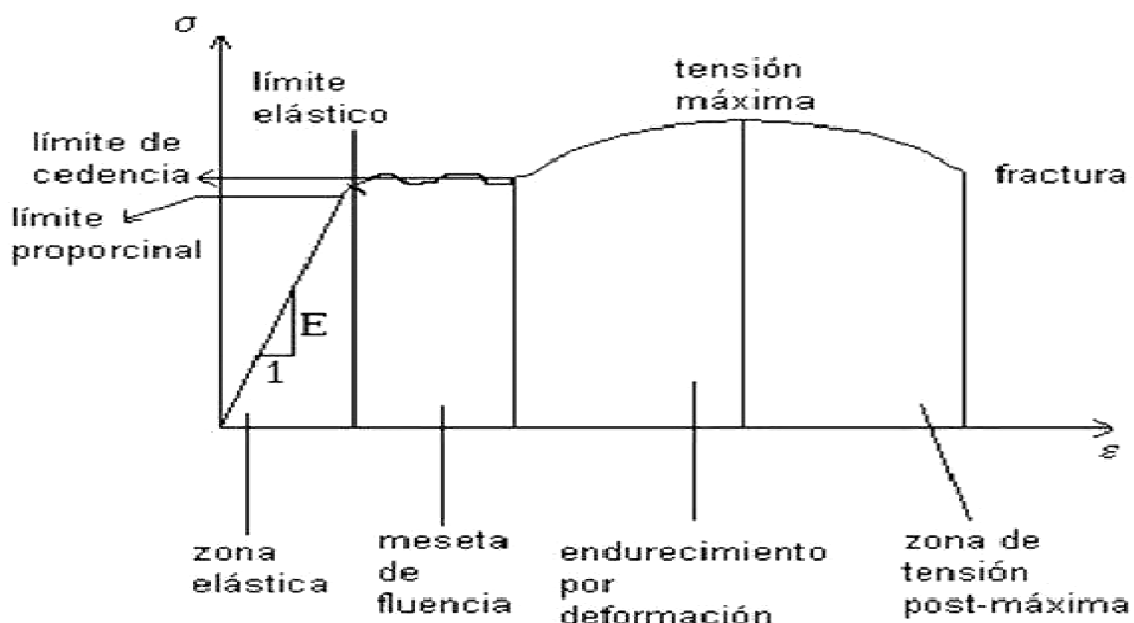


Figura 6. Diagrama esfuerzo - deformación de un material sólido - elástico

Comportamiento plástico

Los polímeros termoplásticos se deforman plásticamente cuando se excede al esfuerzo de cedencia. Sin embargo, la deformación plástica no es una consecuencia de movimiento de dislocación. En lugar de eso, las cadenas se estiran, giran, se deslizan bajo la carga, causando una deformación permanente. Debido a este fenómeno se puede explicar la reducción de esfuerzo más allá del punto de cedencia.

Comportamiento viscoelástico

La capacidad de un esfuerzo para provocar el deslizamiento de cadenas y la deformación plástica está relacionada con el tiempo y la rapidez de deformación. Si el esfuerzo se aplica lentamente, las cadenas se deslizan fácilmente una al lado de otra; si se aplica con rapidez, no ocurre deslizamiento y el polímero se comporta de manera frágil.

La dependencia de las deformaciones elásticas y plásticas de los termoplásticos con el tiempo se explica mediante el comportamiento viscoelástico del material. A bajas temperaturas o bajas velocidades de carga el polímero se comporta como cualquier otro material sólido, como los metales o los cerámicos. En la región elástica el esfuerzo y la deformación están directamente relacionados. Sin embargo, a altas temperaturas o a bajas velocidades el material se comporta como líquido viscoso.

Termofluencia

En los polímeros amorfos la energía de activación y la viscosidad son bajas y el polímero se deforma con esfuerzos reducidos. Cuando al polímero se le aplica un esfuerzo constante sufre con rapidez una deformación, conforme los segmentos de cadena se deforman.

A diferencia de los metales y de los cerámicos la deformación no llega a un valor constante, en vez de ello, debido a la baja viscosidad de la deformación sigue incrementándose con el tiempo, conforme a las cadenas se deslizan lentamente una al lado de la otra.

Pseudoplasticidad

Los fluidos no newtonianos ven reducida su viscosidad al aumentar la velocidad de deformación. Disoluciones de polímeros y polímeros fundidos muestran este tipo de comportamiento, siendo la pseudoplasticidad más o menos marcada dependiendo de la distribución de pesos moleculares y de la estructura del polímero en cuestión.

La pseudoplasticidad de los polímeros fundidos o disueltos se puede explicar de acuerdo a la formación y ruptura de interacciones entre las moléculas del polímero y al desenmarañamiento de las mismas.

En ausencia de cizalla, un polímero fundido se encontraría en un estado aleatorio de “equilibrio” en el cual la movilidad en las cadenas del polímero, propiciada por la temperatura, produce la simultánea desaparición y formación de interacciones entre

las distintas cadenas poliméricas, siendo el resultado neto nulo; la presencia de dichas interacciones y los posibles enmarañamientos entre las cadenas poliméricas son los responsables de la viscosidad del fluido.

Cuando comienza a actuar un esfuerzo de cizalla sobre el fluido se produce una mayor destrucción de las interacciones entre las cadenas poliméricas, pero la movilidad térmica es capaz de compensarlas creándolas por otra parte, dando lugar a cambios apenas observables en la viscosidad del fluido.

Sin embargo, si se continúa aumentando el esfuerzo de cizalla, se puede alcanzar un momento a partir del cual se destruyen más interacciones de las que se crean, dando lugar a una pérdida de la estructura presente; por otra parte, se puede producir también un desenmarañamiento y una alineación de las cadenas poliméricas, que produce una mayor separación entre ellas, siendo el resultado neto de ambos efectos un descenso en la viscosidad del fluido (pseudoplasticidad).

En general la viscosidad suele mostrar una zona Newtoniana a bajas cizallas, hasta una velocidad de cizalla a partir de la cual se observa un descenso paulatino, marcado por la pendiente de la representación en escala doble logarítmica de la viscosidad frente a la velocidad de cizalla (índice de pseudoplasticidad).

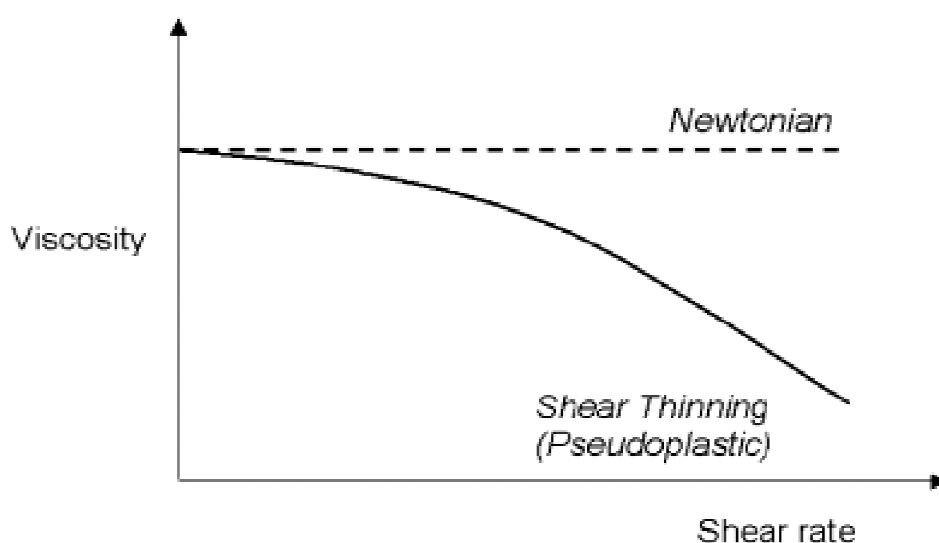


Figura 7. Representación del comportamiento pseudoplástico de un polímero fundido

Cada uno de los parámetros que determinan la forma de la evolución de la viscosidad con la velocidad de cizalla, depende en gran medida de la distribución de pesos moleculares y las ramificaciones del polímero estudiado. La viscosidad aumentará al hacerlo la longitud de sus cadenas pues el mayor desorden (formación de ovillos entremezclados) dificultará más sus movimientos. Respecto a la influencia del tamaño de las ramificaciones de las distintas cadenas poliméricas en la viscosidad a bajas cizallas, la presencia de ramificaciones largas hace que la viscosidad a bajas cizallas sea menor que en aquellos casos en que aquellas sean más cortas.

2. Materiales reforzados con fibras

Cuando se produjo la aparición de los materiales plásticos, se produjo un gran cambio en lo referente al uso de materiales en la industria. Los métodos de producción de estos materiales y el coste relativamente bajo que tenían, hizo que fueran rápidamente introducidos y usados en el sector industrial. Sumado todo esto al perfeccionamiento que ha tenido con el tiempo el empleo de estos materiales, cada vez más adecuados a las necesidades productivas, y el refuerzo con fibras de los materiales plásticos es, un claro ejemplo del por qué estos materiales se han asentado en el sector industrial.

Los plásticos reforzados con fibras (PRF) están compuestos por un polímero (también llamado la matriz) que junto a las cargas y aditivos forman la resina, y unas fibras determinadas.

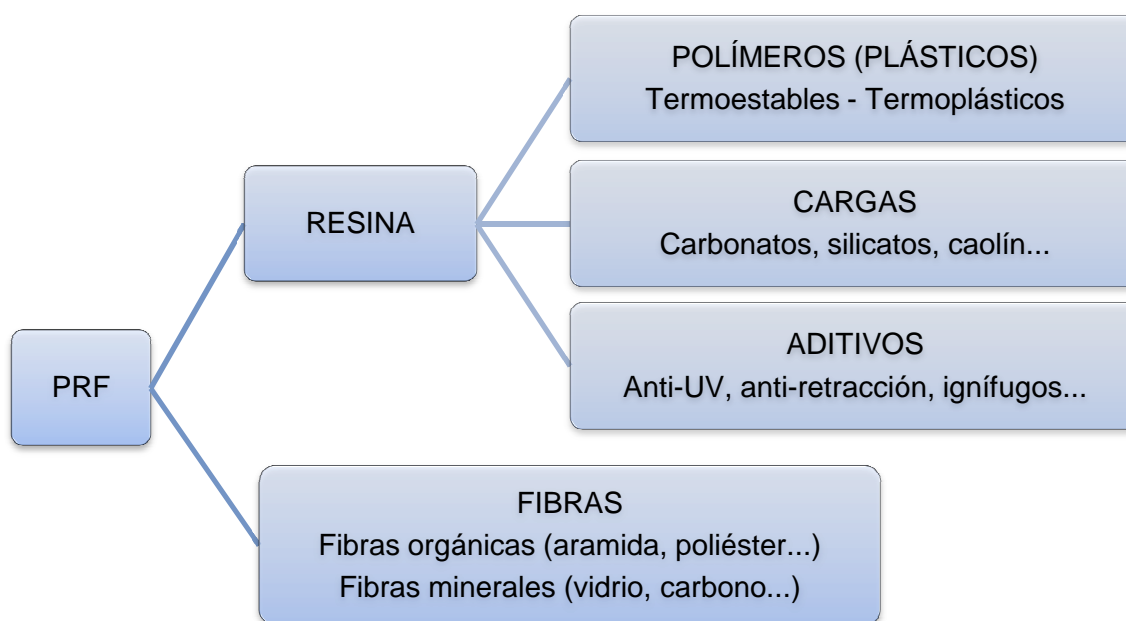


Figura 8. Clasificación de los PRF

El motivo principal por el que añadir fibras, es que proporcionan el refuerzo del compuesto final, y según qué clase de fibra se use junto al polímero, dependerán las propiedades por las cuales se añaden las fibras que son:

- Resistencia mecánica
- Rigidez
- Dureza

A continuación se describen los distintos tipos de refuerzos con fibras centrándonos en la fibra de vidrio.

2.1. Fibra de vidrio

Es el refuerzo más utilizado actualmente en la fabricación de materiales compuestos, sobre todo en aplicaciones industriales. Esto se debe a su gran disponibilidad, sus buenas características mecánicas y su bajo coste.

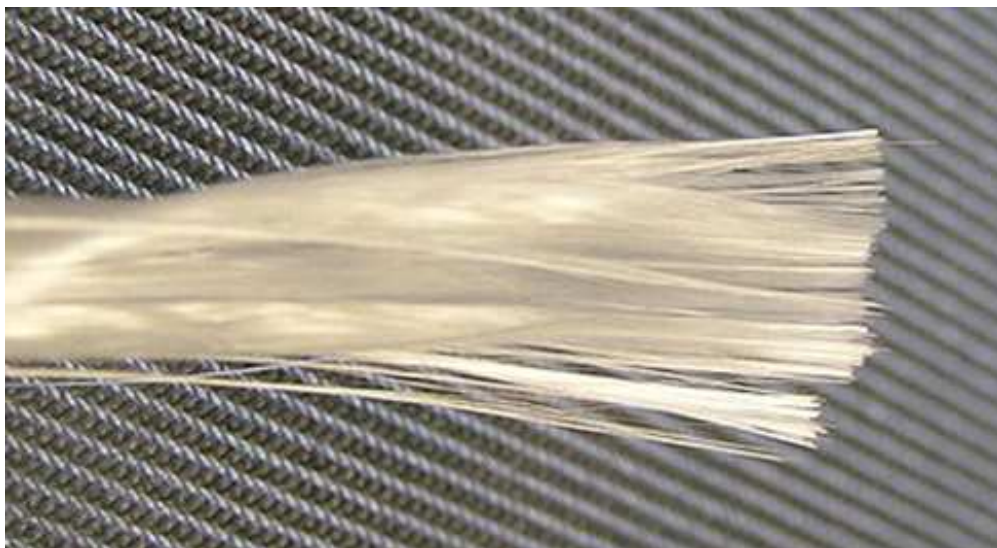


Figura 9. Manojó de fibra de vidrio

La historia de la fibra de vidrio se remonta a la época de los egipcios, quienes descubrieron sus virtudes de resistencia para armar vasos y ánforas en las tumbas de los faraones. Las fibras tejidas datan del siglo XVIII en Francia y la producción de fibra de vidrio continua se consiguió en 1938 en Estados Unidos, formándose la compañía Owens-Corning Fiberglass. Los primeros estudios ingenieriles sobre materiales compuestos fueron realizados sobre materiales compuestos de fibra de vidrio.

2.1.1. Tipos de fibra de vidrio

Cuando se eleva suficientemente su temperatura, el vidrio en general puede ser fibrado. Sin embargo, para efectuar esta operación, es necesario centrarse en unas composiciones determinadas.

En la práctica, los vidrios más utilizados son aquellos a base de sílice que contiene en disolución por lo menos dos silicatos: un silicato alcalino (p.e. silicato de sodio) y uno alcalino térreo (p.e. silicato de calcio).

El óxido de sodio actúa como fundente, facilitando el proceso al bajar la temperatura de fusión de la sílice, así como su viscosidad. Por el contrario, su presencia afecta a la resistencia química del vidrio y por ello se introduce un alcalinotérreo.

Los principales tipos de fibras de vidrio son:

- **Vidrio E (Eléctrico):** representa casi la totalidad del vidrio textil utilizado en materiales compuestos, más del 90% de los refuerzos, de uso general y tiene buenas propiedades eléctricas. La primera gran aplicación industrial del fibra de vidrio E fue el aislamiento de conductores eléctricos sometidos a altas temperaturas.
- **Vidrio A (Alto contenido en álcali):** es menos resistente y tiene un módulo más bajo que el vidrio E. Presenta gran resistencia química.
- **Vidrio AR (Alcali resistente):** es el único tipo de vidrio que puede combinarse con el hormigón o cemento ya que cualquier otro sería atacado por los álcalis liberados en la hidratación del hormigón o cemento.
- **Vidrio C (Químico):** se sitúa entre el vidrio A y el E y se utiliza en las capas superficiales de estructuras anticorrosión, tiene una alta resistencia química.
- **Vidrio R ó S (Resistencia):** empleado en estructuras de elevadas características mecánicas (aeronáutica sobre todo), tiene una resistencia a la tracción y un módulo de elasticidad muy superiores a los otros tipos de vidrio. Nació por la demanda de los sectores punta (aviación, espacio, armamento) y responde a sus exigencias en el campo de los materiales resistentes a la fatiga, temperatura y humedad.
- **Vidrio D (Dieléctrico):** con sus altas propiedades dieléctricas se utiliza sobre todo en la construcción de materiales electrónicos de telecomunicación, fabricación de radares y ventanas electromagnéticas. Estos materiales presentan muy débiles pérdidas eléctricas y de aquí su empleo como material permeable a las ondas electromagnéticas.
- **Vidrio B (Boro):** de excelentes propiedades eléctricas y gran durabilidad. Es borosilicato de calcio de bajo contenido en álcali.
- **Vidrio ERC (Eléctrico y resistente químico):** con propiedades eléctricas combinadas con resistencia química.
- **Vidrio X:** con base de Li_2O por su transparencia a los Rayos X.

2.1.2. Propiedades de la fibra de vidrio

La fibra de vidrio está formada fundamentalmente por sílice, que se asocia a diversos óxidos (alúmina, alcalinos y alcalinotérreos), y se obtiene por la fusión de la mezcla de estas materias, pasando por la hilera y sometiéndose a una operación de estirado.

Tabla 2. Propiedades de los distintos tipos de fibra de vidrio

Tipo	Vidrio A	Vidrio E	Vidrio S	Vidrio R
Diámetro de hilo (μm)	5-13	10-20	10	10
Densidad (Kg/m^3)	2500	2580	2480	2590
Módulo de elasticidad (GPa)	69	72,5	86	85
Resistencia a la tracción (GPa)	3,1	3,4	4,59	3,4-4,4
Módulo específico	28	28	34	33
Coefficiente expansión térmica ($10^{-6}/\text{K}$)	8,6	5	5,1	5

Las principales características de la fibra de vidrio son:

- Alta adherencia fibra-matriz, gracias a recubrimientos apropiados para la mayoría de las matrices orgánicas.
- Resistencia mecánica, siendo su resistencia específica (tracción/densidad) superior a la del acero.
- Características eléctricas. Es aislante eléctrico incluso en espesores reducidos. Tiene buena permeabilidad dieléctrica. Permeable a las ondas electromagnéticas.
- Incombustibilidad, materia mineral, la fibra de vidrio es incombustible por naturaleza. No propaga la llama ni origina con el calor humos ni toxicidad.
- Estabilidad dimensional, poco sensible a las variaciones de temperatura e higrometría, tiene un bajo coeficiente de dilatación.
- Compatibilidad con las materias orgánicas. Su aptitud de recibir diferentes ensimajes creando un puente de unión entre el vidrio y la matriz le confieren la posibilidad de asociarse a numerosas resinas sintéticas, así como a ciertas matrices minerales, tales como el yeso o el cemento.
- Imputrescibilidad (no sufre ninguna alteración). Es insensible a la acción de los roedores y de los insectos.
- Débil conductividad térmica. La utilización de los materiales compuestos en la industria de la construcción permite suprimir los puentes térmicos, dando lugar a un considerable ahorro de calefacción.
- Excesiva flexibilidad.
- Bajo coste.

2.2. Fibra de carbono

Para muchas aplicaciones en las que la fibra de vidrio presenta una rigidez insuficiente, es necesario sustituirla por fibras de carbono, siempre que la gran diferencia de precio este justificada. Básicamente podemos encontrar tres tipos de fibras de carbono en el mercado:

- Fibra de carbono de alto modulo de elasticidad (HM)
- Fibra de carbono de alta resistencia (HR)
- Fibra de carbono III. Es la más barata y presenta propiedades intermedias entre HM y HR

Tabla 3. Propiedades de las fibras de carbono

Tipo	HM	HR	III
Módulo de elasticidad (GPa)	230	390	290
Resistencia a las tracción (GPa)	2.6-5	2.1-2.7	3.1
Elongación en la rotura (%)	2	0.7	1.1

Propiedades de la fibra de carbono:

- Elevado modulo de elasticidad y resistencia a tracción
- No presenta plasticidad, el límite de rotura coincide con el límite elástico
- Baja densidad
- Elevada resistencia a las altas temperaturas (a temperaturas del orden de los 1500 – 2000 °C presenta un incremento de sus prestaciones)
- Coeficiente de dilatación térmica prácticamente nulo
- Elevada resistencia
- Buena conductividad eléctrica y térmica
- Alto coste
- Baja resistencia al impacto de baja energía
- Produce diferencias de potencial al contacto con los metales, lo que puede favorecer corrosiones

2.3. Fibras orgánicas

Dentro de estas la más utilizada por sus características son las fibras de aramida. Quizás la característica más llamativa de las aramidas es su alta resistencia al impacto, su gran tenacidad y su alta capacidad de absorción de energía, motivos por los cuales es usada incluso en chalecos antibala.

Podemos destacar estas otras características:

- Elevada resistencia específica a la tracción (5 veces más resistente que el acero)
- Buena estabilidad mecánica (-30°C/200°C)
- Alto módulo de elasticidad y baja a la rotura
- Gran estabilidad química, excepto contra ácidos fuertes y bases muy concentradas

En cuanto a desventajas podemos destacar una baja resistencia a compresión y flexión, pérdidas de resistencia en presencia de humedad y baja adherencia a determinadas matrices, más concretamente a los termoplásticos. Además, su precio es elevado en comparación con otras fibras.

2.4. Otros tipos de fibras

Aunque los anteriores tipos de fibras son los más usados en la industria, existen más tipos de fibras que aunque, aporten prestaciones más altas, estas son en la mayoría de sus aplicaciones excesivamente caras según el uso que queramos de nuestro compuesto final.

- **Fibras cerámicas.** Estas fibras surgen por la necesidad en sector aeroespacial de refuerzos para altas temperaturas. Además de esta resistencia, presentan altísimas prestaciones en cuanto a resistencia a tracción y estabilidad química. Sin embargo, su fabricación y manipulación es extremadamente complicada y costosa.
- **Fibras de boro.** Son fibras obtenidas a partir de la deposición en sustrato de wolframio o de carbono, siendo las primeras las más utilizadas, aunque únicamente en el sector espacial, militar o aeronáutico, debido a su elevado coste.
- **Fibras de carburo de silicio.** Esta fibra ha sido utilizada con éxito como refuerzo de matrices orgánicas y cerámicas. Tiene un coste menos elevado que la de boro, por lo que se está utilizando en mayor medida que este como refuerzo.

- **Fibras de cuarzo.** A partir de cristales de cuarzo natural se forman filamentos. Alrededor de 200 filamentos combinados dan lugar a una fibra flexible y con alta resistencia. Se puede utilizar con la mayoría de las resinas.
- **Fibras metálicas.** Tienen la desventaja de su densidad y coste, pues son más caras que la fibra de vidrio (a excepción del acero). Según el metal de la fibra aportan propiedades como resistencia a la corrosión, resistencia mecánica o química, conductividad térmica o eléctrica.

3. Moldeo por inyección

3.1. Introducción

Una de las técnicas de procesamiento de plásticos que más se utiliza es el moldeo por inyección, siendo uno de los procesos más comunes para la obtención de productos plásticos. Hoy en día cada casa, cada vehículo, cada oficina, cada fábrica, etc. contiene una gran cantidad de diferentes artículos que han sido fabricados por moldeo por inyección. Entre ellos se pueden citar: teléfonos, vasijas, etc.

El moldeo por inyección requiere temperaturas y presiones más elevadas que cualquier otra técnica de transformación, pero proporciona piezas y objetos de bastante precisión (siempre y cuando la resina utilizada no tenga una retracción excesiva), con superficies limpias y lisas, además de proporcionar un magnífico aprovechamiento del material, con un ritmo de producción elevado. Sin embargo, a veces, las piezas deben ser refinadas o acabadas posteriormente, para eliminar rebabas.

El fundamento del moldeo por inyección es inyectar un polímero fundido en un molde cerrado y frío, donde solidifica para dar el producto. La pieza moldeada se recupera al abrir el molde para sacarla. Una máquina de moldeo por inyección tiene dos secciones principales:

- La unidad o grupo de inyección
- La unidad de cierre, o prensa, que aloja al molde

El ciclo de producción consta de ocho fases:

- 1) Cierre del molde
- 2) Avance del grupo de inyección
- 3) Inyección del material en el molde, cerrado y frío
- 4) Mantenimiento de la presión

- 5) Refrigeración y solidificación del objeto (comienza al terminar la inyección y dura hasta que empieza la apertura del molde)
- 6) Retroceso del grupo de inyección
- 7) Plastificación del material para el ciclo siguiente
- 8) Apertura del molde y expulsión de la pieza

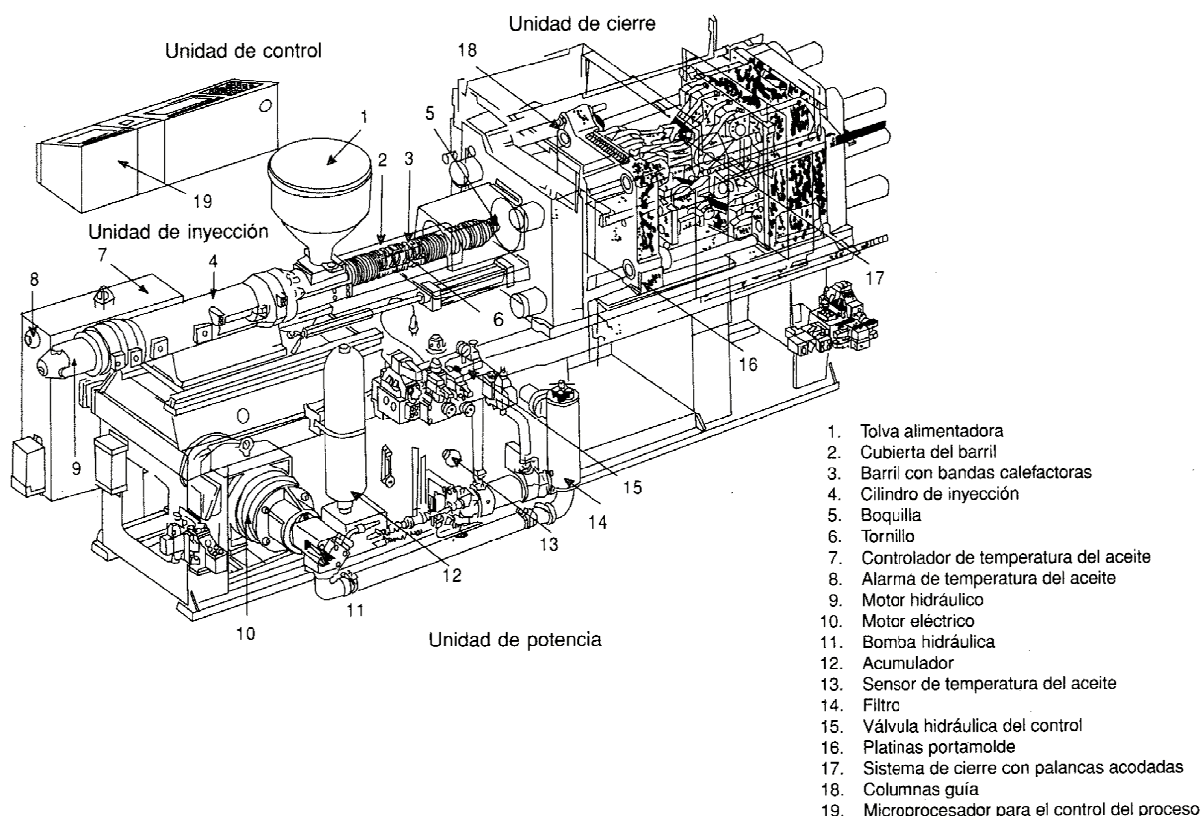


Figura 10. Partes fundamentales de una máquina inyectora

En ciertas ocasiones, cuando el tiempo de enfriamiento es suficientemente largo, puede disponerse una unidad de inyección que se acopla a varias unidades de moldeo, con lo que aumenta la productividad de la máquina.

Los elementos esenciales de una unidad de inyección son: la tolva de alimentación, el sistema de dosificación, plastificación e inyección y la unidad de moldeo-desmoldeo. La tolva de alimentación se conecta mediante un conducto al cilindro donde tiene lugar la plastificación. Para evitar atascos por reblandecimiento prematuro del material, debe ir refrigerado. A veces se aprovecha este conducto y la propia tolva para completar el secado de la resina que se está utilizando. El sistema de dosificación, plastificación e inyección admite la cantidad necesaria de resina, la reblandece o funde y la inyecta en el molde a través de una boquilla que, al adaptarse a presión al bebedero del molde,

abre una válvula de descarga dispuesta en su extremo. Al desacoplar la boquilla, la válvula se cierra automáticamente.

En la actualidad casi todas las máquinas de inyección disponen de un pistón de dosificación-plastificación en forma de husillo que, al girar cierto número de vueltas, realiza la carga del material, siendo obligado por éste a retroceder hasta una posición tope, previamente regulada, quedando el cilindro completamente lleno de material. La plastificación mediante husillo proporciona una fusión regular y homogénea, con poco riesgo de degradación térmica, y posibilita un llenado del molde a presiones más bajas, combinando el movimiento giratorio con su desplazamiento longitudinal. El extremo libre del husillo dispone de un anillo que actúa como válvula de retención, impidiendo el retroceso del material a su través durante la inyección.

El trabajo que realiza el husillo es el siguiente: cuando termina la inyección anterior se queda en la posición más adelantada. Al empezar a girar, toma el material frío de la tolva y lo transporta hacia la parte delantera, al tiempo que lo calienta. Una vez que llega a la parte anterior, estando la válvula de descarga cerrada, el husillo ejerce grandes esfuerzos de cortadura sobre el material, como ocurre en las extrusoras, a la vez que retrocede y, cuando tiene acumulada suficiente cantidad para llenar el molde, deja de girar, quedando en espera. Al acoplarse la boquilla al bebedero, se abre la válvula de descarga y el husillo actúa ahora como émbolo, comprimiéndole y haciéndole fluir a través de la tobera, hasta llenar el molde, transmitiendo al interior de éste toda la presión.

La cámara del cilindro de plastificación-inyección va provista de un sistema de calentamiento mediante resistencias individuales que permiten una regulación de la temperatura de la pared por zonas y mantiene la resina plastificada entre inyección e inyección.

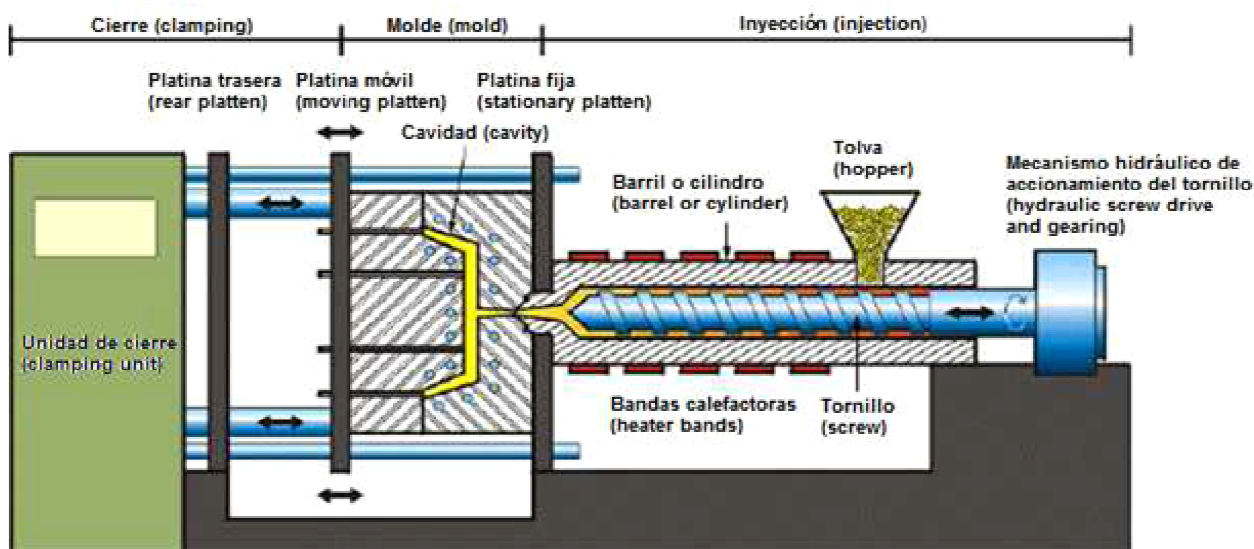


Figura 11. Esquema de máquina de moldeo por inyección

Las unidades de moldeo constan de las dos partes del molde sujetas mediante piezas portamoldes y ciertos mecanismos (generalmente hidráulicos) que tienen por misión su abertura y cierre. Estos mecanismos tienen que ser suficientemente robustos para resistir la presión del material en la etapa final de la inyección, que puede superar los 50 MPa y llegar a los 200 MPa.

Las primeras máquinas de moldeo por inyección para la fabricación de plásticos se basaban en las máquinas empleadas para la fabricación de metales por fundición a presión. A partir de la década de los 50 se desarrollaron máquinas especialmente diseñadas para la fabricación de polímeros, coincidiendo con una mayor demanda de este tipo de productos.

Las principales ventajas del moldeo por inyección son:

- El grado de automatización alcanzado con estas máquinas
- La posibilidad para fabricar productos plásticos con tolerancias muy pequeñas
- Versatilidad para el moldeo de una amplia gama de productos, tanto en formas como en materiales plásticos distintos

3.2. Tipos de máquinas de inyección

Existen básicamente dos tipos de máquinas de moldeo por inyección: la máquina de émbolo (o pistón) y la máquina de tornillo recíproco.

3.2.1. Máquina de émbolo (o pistón)

Como su propio nombre indica, la máquina de émbolo se sirve de un émbolo para forzar el paso del polímero fundido al interior del molde. Un sistema de pre-plastificación previa, basado en un tornillo extrusor, puede emplearse para mejorar la mezcla y preparación del polímero fundido. La máquina de émbolo fue la primera en ser desarrollada y la tendencia es a que este tipo de máquinas sean sustituidas por la máquina de tornillo recíproco, pero todavía existen algunas en la actualidad. Los últimos avances en la máquina están encaminados hacia sistemas de control mediante programas informáticos para intentar controlar las principales variables que intervienen en el proceso: presión, temperatura y tiempos de inyección.

Su funcionamiento es el siguiente: una cantidad predeterminada del material a moldear cae del dispositivo de almacenamiento en la camisa. A continuación, el émbolo transporta el material a lo largo de la camisa donde es calentado por conducción por medio de los calentadores externos. El material plastificado bajo presión es forzado a pasar a través de la lanza hacia la cavidad del molde. Para dividir la masa de material en la camisa y mejorar la transferencia de calor, se ajusta un torpedo en la camisa.

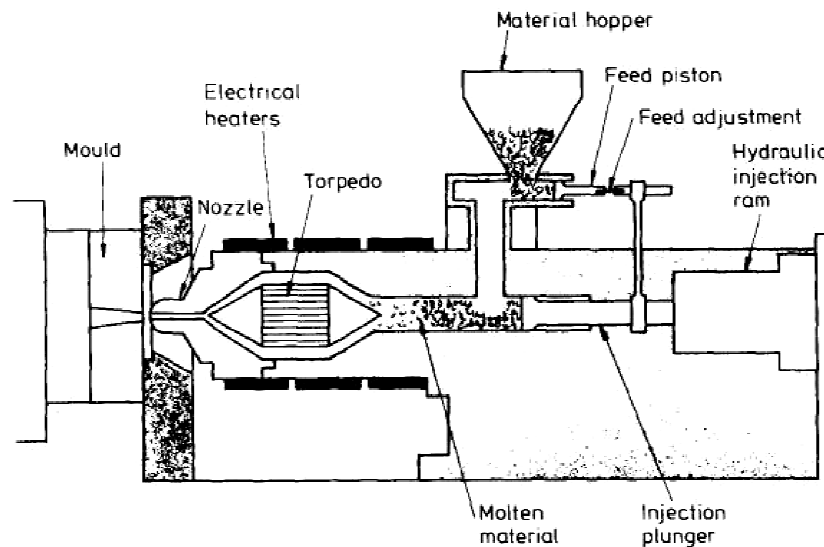


Figura 12. Máquina de inyección de tipo émbolo

Este tipo de máquina tiene las siguientes desventajas:

- Hay una deficiente mezcla y homogeneización del polímero fundido.
- Es difícil medir con exactitud la cantidad de material en cada ciclo de moldeo. Puesto que, la dosificación se realiza en volumen, cualquier variación de la densidad del material alterará el peso de cada embolada.
- Puesto que el émbolo comprime al material y este se presenta en una variedad de formas, variando desde gránulos sólidos a un fundido viscoso, la presión en la boquilla puede variar de forma considerable de un ciclo a otro.
- La presencia de un torpedo causa una significativa caída de presión.
- Las propiedades de flujo del polímero fundido dependen de la presión y como esta es errática, se incrementa la variabilidad de llenado del molde.

Algunas de las desventajas de la máquina de émbolo se pueden eliminar usando un sistema de pre-plastificado. Este tipo de máquinas posee dos camisas. El material se alimenta en la primera donde un extrusor con tornillo plastifica al material y luego lo alimenta a la segunda camisa a través de una válvula de no retorno. A continuación, un émbolo en la segunda camisa fuerza al fundido a pasar a través de la boquilla hacia el molde. En este sistema hay una homogeneización mucho mejor debido a que el fundido tiene que pasar a través de las pequeñas aberturas que conectan las dos camisas. Así mismo, la cantidad de material puede medirse con más exactitud ya que el material alimentado a la segunda camisa puede controlarse mediante una llave límite sobre el émbolo. Otra ventaja es que ya no es necesario un torpedo en el cilindro de inyección. Esta máquina, hoy en día, se utiliza raramente debido a que es considerablemente más complicada y cara de lo necesario. Un área de aplicación donde aún se usa es para la obtención de grandes piezas (moldes grandes) debido al gran volumen de material que es necesario plastificar antes de la inyección.

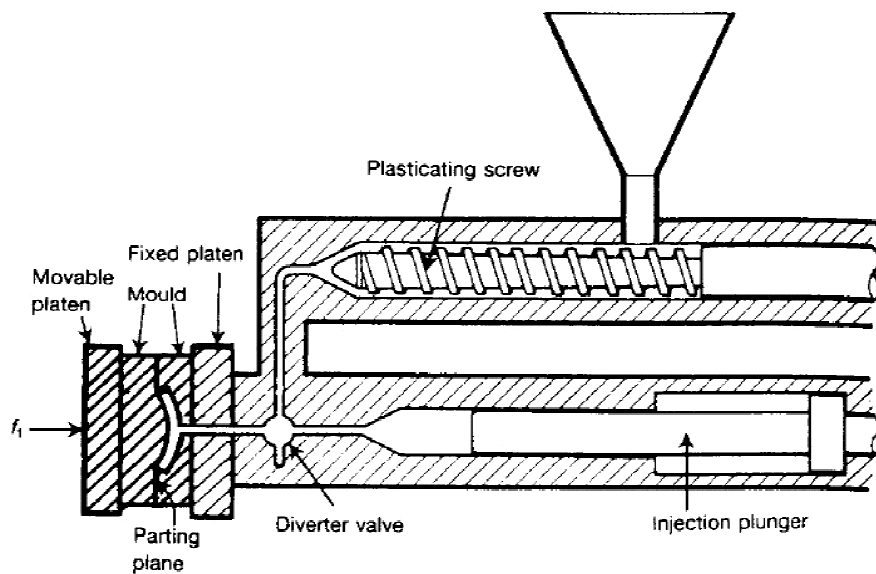


Figura 13. Máquina de inyección de tipo émbolo con sistema de pre-plastificado

3.2.2. Máquina de tornillo recíproco

En este tipo de máquina se utiliza un tornillo de extrusión tanto para fundir y manejar el polímero fundido, como para inyectarlo en el interior del molde. El tornillo tiene un movimiento de vaivén, como si fuera un pistón, dentro de la camisa durante la parte de inyección del ciclo de producción. Se utiliza para procesar tanto termoplásticos como termoestables.

Durante la fase de plastificación, el extremo de salida está sellado por una válvula, y el tornillo acumula una reserva, o "carga" de material fundido frente a él, al moverse hacia atrás en contra del frente de presión. Cuando se completa esta etapa, abre la válvula de sellado, el tornillo detiene su giro y se le aplica presión que lo convierte en un empujador mecánico o pistón que impulsa el material fundido acumulado, a través de la boquilla que conecta con el molde, que se encuentra en la unidad de cierre. Esta es la etapa de inyección del proceso.

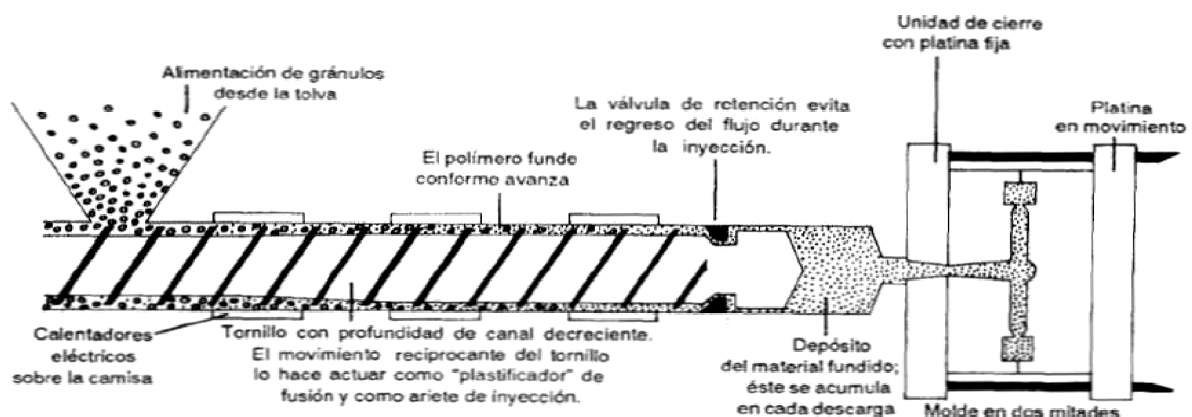


Figura 14. Máquina de inyección de tipo tornillo recíproco

La secuencia de operación o ciclo de moldeo de una máquina de este tipo sería la siguiente:

- El molde se cierra, y el tornillo (sin girar) se mueve hacia delante a lo largo del cilindro actuando como un émbolo o pistón e inyecta el polímero fundido en el molde. La válvula se ha abierto y el tornillo fuerza el paso del material fundido por la boquilla hacia el molde. El tornillo permanece adelantado, manteniendo la presión, hasta que el polímero fundido que ha estado entrando en el molde. Esta etapa se denomina de “retención”, donde se mantiene la presión mientras el material se enfría para evitar la contracción. En un determinado momento (idealmente cuando el material del orificio para inyección se ha solidificado) puede eliminarse la presión y el tornillo comienza nuevamente a girar, con la válvula cerrada, cogiendo nuevo material de la tolva de alimentación, que se calienta a lo largo de la máquina hasta fundir cuando alcanza la parte de adelante del tornillo. Como consecuencia de este nuevo volumen de material que estamos llevando hacia adelante se originan unas fuerzas de presión (el polímero fundido no puede salir) contrarias al sentido de avance del tornillo cuando éste estaba funcionando como émbolo. El resultado de estas fuerzas de presión es el empuje del tornillo hacia atrás hasta que se alcanza un límite.

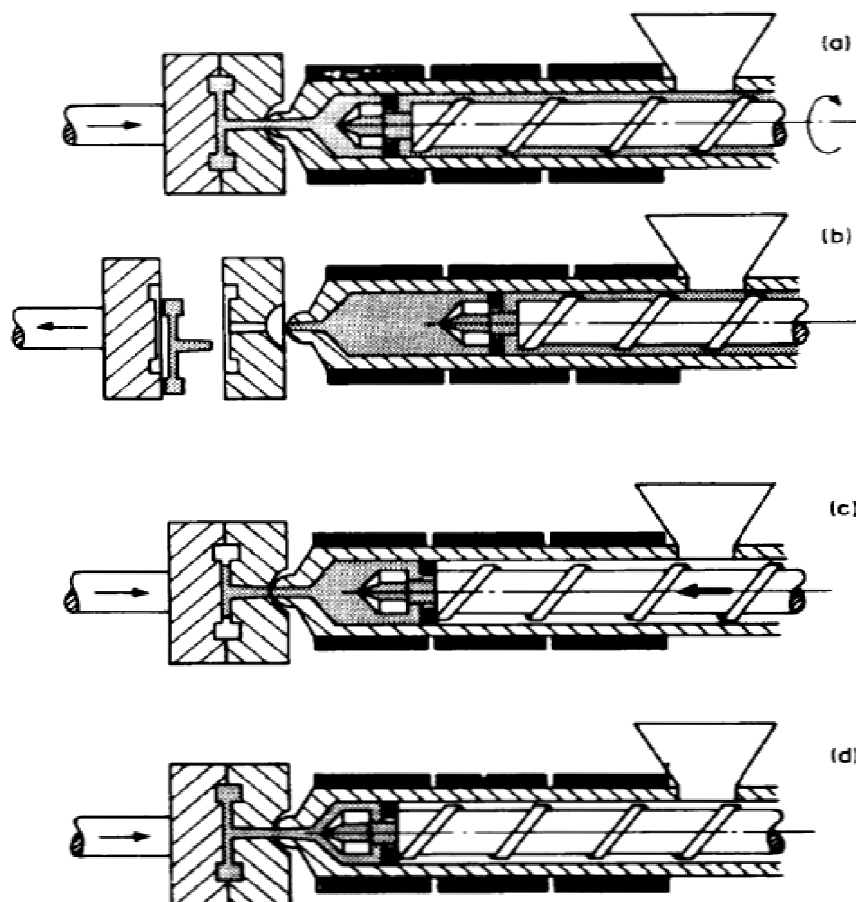


Figura 15. Ciclo típico de una máquina de tornillo recíproco

- Cuando se alcanza el volumen necesario de polímero fundido para llenar el molde y todas las cavidades de entrada, el tornillo deja de girar. Durante el período de retroceso del tornillo el polímero que estaba en el molde ha tenido tiempo de solidificar convenientemente, por lo que el molde se abre y el plástico solidificado es expulsado.
- El molde se cierra nuevamente y el tornillo hace de émbolo volviendo a inyectar el polímero fundido en el molde.
- El tornillo permanece adelantado, manteniendo la presión hasta que el material del orificio para inyección se ha solidificado y el tornillo comienza a girar y a retroceder, volviendo a repetirse el ciclo.

Una gran parte del tiempo del ciclo total se debe al enfriamiento, en que se incluye el tiempo de retención. Como consecuencia, la rapidez de enfriamiento es un aspecto importante en la economía del moldeo por inyección.

Los tornillos son parecidos a los utilizados en la extrusión. La profundidad del canal del tornillo disminuye desde el extremo de alimentación hacia el extremo de salida para favorecer la compresión del material que contiene. La camisa tiene calentadores de cincho que lo rodean. El calentamiento se debe en parte a los calentadores de la camisa y en parte a la disipación viscosa que ocurre conforme el polímero fundido se bombea a lo largo del tornillo. Una diferencia importante es la presencia de una válvula de retención de un solo sentido de paso, colocada en la cabeza del tornillo, que es necesaria para evitar que haya pérdidas de material por las juntas de los hilos del tornillo cuando éste actúa como émbolo. La válvula está cerrada mientras se inyecta material para evitar el flujo de retroceso del mismo después de pasar el hilo del tornillo, y está abierta cuando gira el tornillo para permitir la acumulación de la nueva carga.

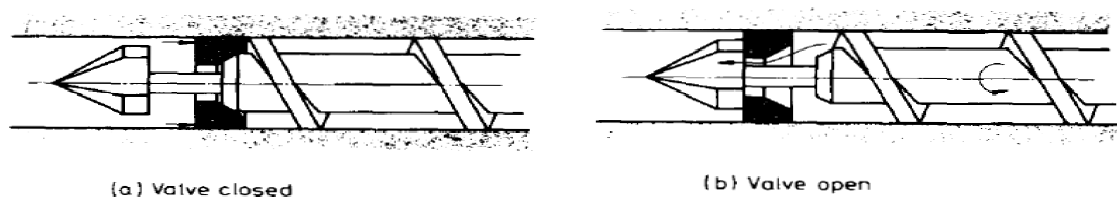


Figura 16. Posiciones de la válvula de retención

Cuando el material es transportado hacia delante por la rotación del tornillo la válvula se abre como se muestra en la figura 16 (b). Se presenta una excepción cuando se está trabajando con materiales sensibles al calor, como por ejemplo el PVC. En tales casos no existe válvula, debido a que daría lugar a zonas donde el material quedaría obstruido y podría degradarse.

La parte cilíndrica o camisa es muy parecida a la parte cilíndrica de la máquina de extrusión, con unas bandas eléctricas que calientan el material y que se controlan usando termopares. El desarrollo más reciente es la introducción de camisas con

cámara de desaireación, lo que permite el moldeo de los materiales sin un secado previo.

El canal salida o boquilla, que está atornillada al final de la camisa, conecta las dos mitades de la máquina para dejar pasar el material fundido desde la etapa de plastificación hacia el molde. Por tanto, su función principal es la de conducir el polímero fundido desde la camisa hasta el interior del molde. Durante esta operación el polímero fundido se calienta por fricción y conducción (existe una banda de calentamiento exterior) antes de entrar en los canales del molde que se encuentran a temperatura ambiente. Para evitar una solidificación del fundido que queda en la boquilla, por transferencia de calor hacia el material del molde, una vez llenado el molde, se retira la boquilla cuando el tornillo comienza su movimiento hacia atrás. Existen dos tipos principales de canal de salida o boquilla:

- Boquilla abierta, figura 17 (a), que es simple y se usa siempre que sea posible, ya que las posibles caídas de presión se ven minimizadas y no se presentan zonas donde el fundido pueda estancarse y descomponerse. Sin embargo, los materiales fundidos de baja viscosidad, como el nylon, presentan fugas en este tipo de boquilla, lo que provoca contaminación y crea desperdicios, particularmente si el conjunto camisa- boquilla se retrae desde el molde en cada ciclo.
- Boquilla con cierre, de la cual existen dos tipos principales. La figura 17 (b) muestra una boquilla de cierre, que se cierra mediante medios mecánicos externos simples. La figura 17 (c) muestra una boquilla de cierre donde una válvula de aguja sobre la que actúa un muelle evita que existan fugas o escapes de material. La válvula se abre cuando la presión del fundido excede de un determinado valor o alternatively cuando la boquilla es presionada contra el molde. La mayoría de las boquillas de cierre tienen la desventaja de que pueden restringir el flujo de material causando estancamiento del mismo. Por esta razón, este tipo de boquillas no deben usarse con materiales sensibles al calor, como es el caso del PVC.

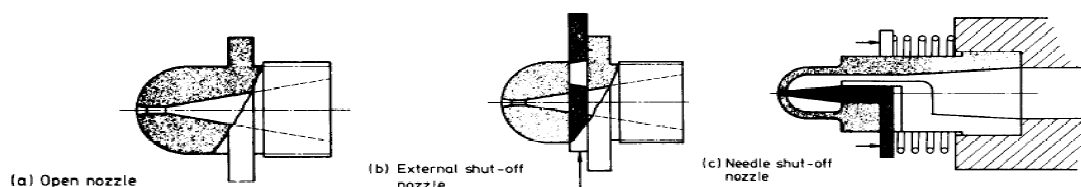


Figura 17. Tipos de boquilla: (a)abierta, (b)de interrupción mecánica simple, (c)válvula de agua

Por lo común, las boquillas se calientan por medio de una banda calefactora, pero también se genera el calentamiento viscoso, ya que en este punto el canal se estrecha y, por lo tanto, la velocidad de corte es más alta. Disminuye entonces la viscosidad, lo que a su vez, facilita la inyección. Por lo común, se evita que el polímero solidifique en la boquilla después de la inyección y retención, y ésta será la situación que se crearía

por el contacto con el molde frío. Con frecuencia, la boquilla no se mantiene en contacto, o se puede aislar térmicamente. El polímero que solidificó en la boquilla tiene que volverse a fundir en la siguiente inyección, lo cual genera inconsistencias de temperatura y, por tanto, irregularidades del flujo en el material fundido conforme avanza hacia el molde. Esto, a su vez, provoca defectos del producto.

Unidad de cierre. Apriete del molde

Es necesario mantener las dos partes del molde firmemente unidas y ajustadas durante la inyección por la alta presión que se produce en este proceso. Por ello, es necesario disponer de un sistema de apriete. Experimentalmente se ha comprobado que la presión de cierre del molde, en torno al área del molde que va a sufrir la alta presión, está entorno a los 10-50 MPa, pero puede exceder de 140 MPa y muy bien pueden ser necesarios 200 MPa para evitar fugas en las superficies de acoplamiento del molde. La fuerza necesaria de cierre para una pieza moldeada determinada puede encontrarse a partir de su área proyectada.

La presión de inyección que se aplica sobre el área proyectada proporciona la fuerza de inyección y, por lo tanto, la fuerza de cierre que se requiere para resistirla. Una manera de evaluar los tamaños de máquina es de acuerdo a la fuerza de cierre disponible; cuanto mayor sea la fuerza disponible, más grande es la máquina. Los dos sistemas de cierre más utilizados son:

- Sistema mecánico que amplifica la fuerza (palanca), se utiliza sobre todo cuando se buscan presiones de cierre relativamente bajas (fuerzas de apriete relativamente pequeñas) y se prefieren para máquinas de alta velocidad.

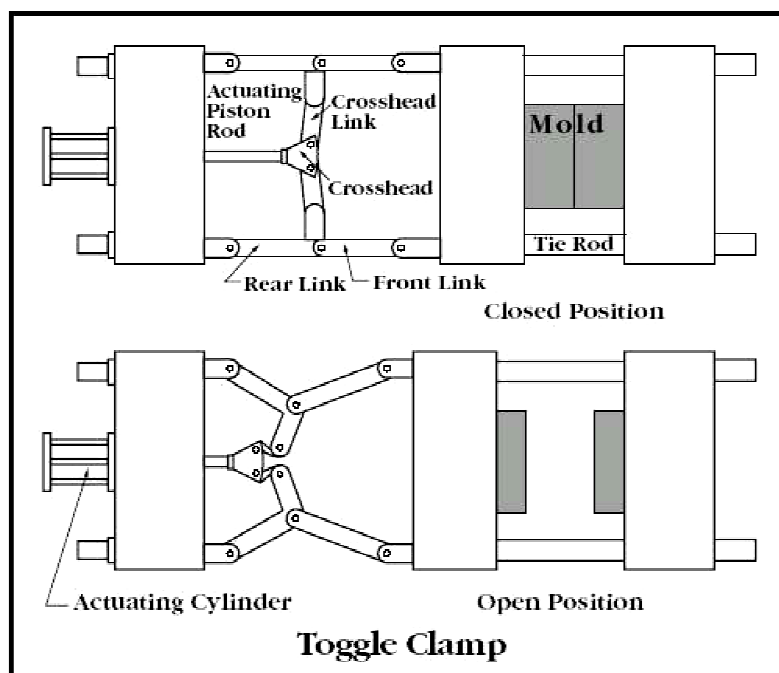


Figura 18. Sistema de cierre mecánico

- El sistema hidráulico, se utiliza cuando están en juego presiones de cierre más altas. Requiere menos mantenimiento que el otro sistema. Líquido hidráulico a presión se introduce por detrás de un pistón conectado a un plato de presión móvil de la máquina.

La fuerza de apriete puede ajustarse de tal manera que no se produzcan fugas del polímero fundido del molde.

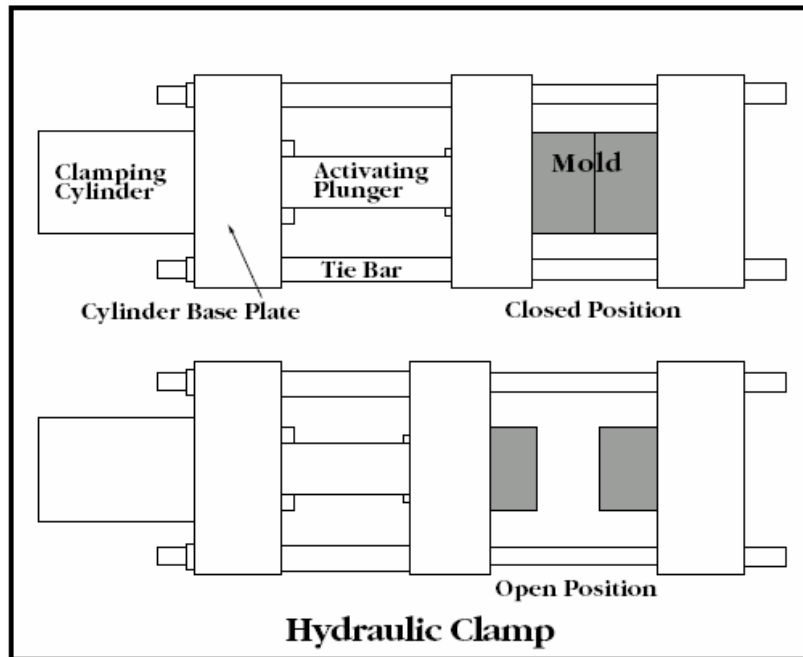


Figura 19. Sistema de cierre hidráulico

Las dos principales ventajas del sistema mecánico son que es más económica la operación del pequeño cilindro hidráulico y que no es necesario mantener la presión hidráulica durante el ciclo de moldeo, ya que el dispositivo mecánico se autosujeta.

Tiene las desventajas de que no existe indicación del valor de la fuerza de apriete y que las partes móviles adicionales aumentan los costes de mantenimiento.

Presión de inyección

La presión alta que se necesita para inyectar se debe a la alta viscosidad de los polímeros fundidos y se aplica por medio de un tornillo mediante un sistema hidráulico, que para esa función no gira. La presión de línea del sistema es del orden de 7-14 MPa. El diámetro del cilindro hidráulico es de 10 a 15 veces el del tornillo, el cual eleva la presión hasta alcanzar la que se necesita para inyectar el material fundido viscoso.

3.3. Control de presión, temperatura y tiempo

La calidad de los productos obtenidos en el moldeo por inyección incluye propiedades mecánicas, calidad de la superficie, dimensiones y densidad. Para obtener una calidad aceptable y reproducible, es esencial mantener el proceso de moldeo bajo un control preciso y así las máquinas modernas están controladas por medio de microprocesadores. Las entradas al sistema de control son:

- Temperaturas en la camisa, boquilla y molde medidas mediante termopares.
- Presión del líquido hidráulico que actúa sobre el brazo del émbolo.
- Presión del polímero en el molde.
- Posición y velocidad del brazo del émbolo mediante un sensor tipo potenciómetro.

Estos datos deben ser usados para optimizar el ciclo y obtener la calidad requerida en el tiempo de ciclo más corto posible. Durante el proceso productivo los parámetros óptimos determinados deben de repetirse de ciclo en ciclo de la forma más precisa que sea posible.

Se ha encontrado conveniente controlar las acciones dominantes en la inyección, llenado del molde y compactación (empaquetamiento), de dos maneras alternativas:

Alternativa A

Moviendo el brazo hacia delante a una secuencia de velocidades, altas al principio y bajas al final cuando la etapa de llenado del molde está próxima al final y cambiando al control de la presión del brazo para la etapa de compactación.

Una vez que el molde está lleno, el brazo detiene su movimiento y es de menor importancia para el control del empaquetamiento. Otra razón para controlar la velocidad durante el llenado del molde se basa en que la velocidad influye sobre el acabado superficial, la contracción y la anisotropía.

En la primera etapa los datos son suministrados por el sensor de posición del brazo y el parámetro corrector es la presión hidráulica del brazo. Para la segunda etapa los datos son suministrados por el sensor de presión del brazo y el parámetro corrector es el mismo.

La presión de compactación constante se aplica durante un determinado tiempo y luego su valor se disminuye hasta el valor de la presión de mantenimiento hasta que la compuerta solidifica. Después del tiempo de permanencia a la presión de mantenimiento, el tornillo gira en sentido contrario. Durante esta fase, y con el fin de lograr una viscosidad consistente del fundido, la presión de retroceso se mantiene en un valor bajo y constante. Cuando el tornillo gira a una velocidad fija, la presión de retroceso afecta al par torsor y, por tanto, al trabajo realizado y a la temperatura del fundido, que aumenta si lo hace la presión de retroceso.

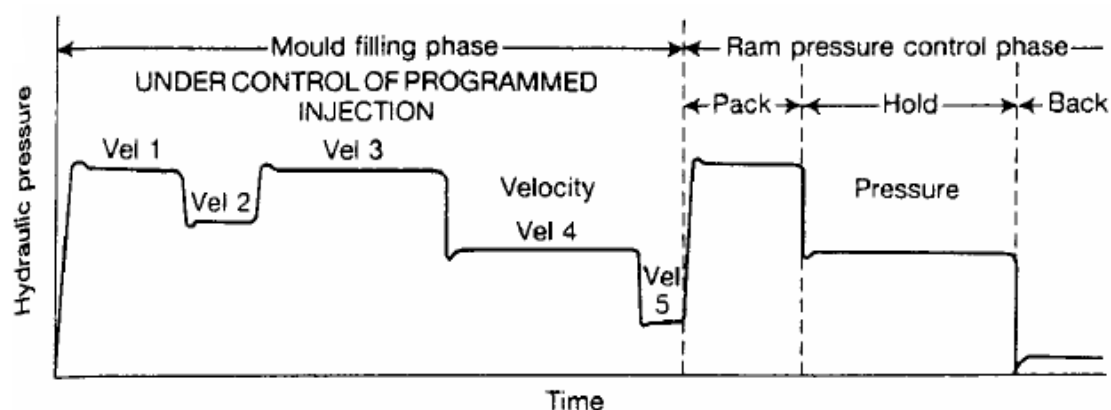


Figura 20. Presión que actúa sobre el brazo en función del tiempo durante el llenado del molde y la compactación.

Alternativa B

La presión sobre el brazo gobierna la presión en la cavidad, pero está claro que debido al estrechamiento del tornillo en la camisa, etc., la medida de la presión en la cavidad debería de ser un parámetro del control más directo. Esto proporciona un modo alternativo a la segunda etapa. El brazo se mueve hacia delante a una velocidad controlada hasta que se completa el llenado del molde y entonces para la compactación moviendo el brazo hacia delante a una secuencia de velocidades, altas al principio y bajas al final cuando la etapa de llenado del molde está próxima al final. El microprocesador cambia al sensor de la presión en la cavidad.

El control se logra comparando la presión en la cavidad con la del punto de consigna. Si existe diferencia el controlador aumentará o disminuirá la presión (ver figura 21) en el ciclo siguiente. El parámetro corrector es la presión hidráulica en el brazo.

Un control aparte se ejerce sobre el volumen de fundido que permanece en el frente del tornillo después de la inyección, el cual afecta a la presión transmitida desde el sistema (brazo hidráulico y brazo) a la cavidad durante la compactación. Dicho volumen lo mide el sensor de posición del brazo y si, por ejemplo, es bajo el tornillo, se retira más adelantado durante la fase de rotación del ciclo siguiente.

La temperatura del molde controla el grado de tensiones residuales en la pieza y en los polímeros cristalinos el grado de cristalinidad. Ambos parámetros afectan a las propiedades mecánicas y, en particular, a la resistencia. La temperatura óptima en el molde es un compromiso entre la exigencia de bajar el tiempo total del ciclo, que implica bajar la temperatura del molde y la exigencia de mejorar las propiedades mecánicas, que implica aumentar la temperatura del molde.

Las macromoléculas durante su paso en estado fundido por el tornillo y la boquilla se encuentran sometidas a importantes tensiones de corte y elongacionales, por lo que debe permitirse la relajación de tensiones a un nivel aceptable en el interior del molde.

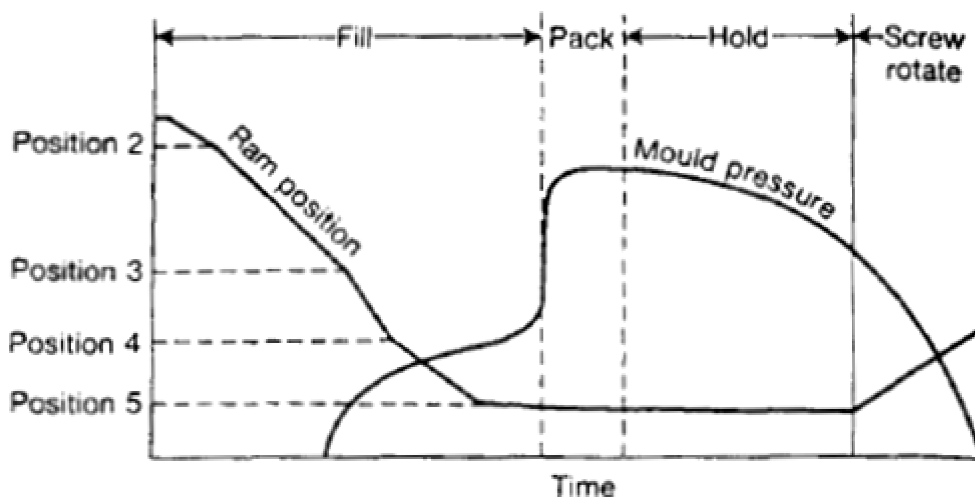


Figura 21. Posición del brazo y presión en el molde en función del tiempo durante el llenado del molde y la compactación

La temperatura del molde se controla pasando fluidos de temperatura controlada a través de agujeros interconectados existentes en el molde. Es función del fluido termostático eliminar calor tan rápido como sea posible del molde y transferirlo al sistema de enfriamiento. Los requerimientos son:

- Lograr una distribución de la temperatura lo más uniforme que sea posible para llegar a la uniformidad en el producto moldeado.
- Eliminar el calor de la cavidad del molde de modo uniforme, con el fin de evitar alabeos.
- Eliminar el calor rápidamente de modo que se puedan conseguir ciclos de menor duración.

3.4. Variantes del proceso de moldeo por inyección

3.4.1. Moldeo tipo sándwich

Uno de los métodos para mejorar la rigidez estructural de los componentes plásticos es producir, paneles tipo sándwich. Existen dos posibilidades, bien utilizando un sistema con un solo polímero para producir una espuma estructural, o bien combinando dos sistemas de polímeros para formar una capa superficial y un núcleo (sándwich).

Las espumas estructurales se producen mediante dispersión de un gas inerte directamente a través del polímero fundido antes de pasarlo al molde. Esto se consigue añadiendo un agente químico espumante que libere el gas cuando éste se calienta, o inyectándole gas directamente (usualmente nitrógeno). Cuando la mezcla

comprimida de gas-polímero se inyecta rápidamente en el molde, el gas se expande y fuerza al material a ir hacia todas las partes de molde.

En ambos casos el polímero fundido va a enfriar contra las paredes del molde antes de que el gas se disperse totalmente con lo que el producto resultante del moldeo va a tener una capa superficial densa y un corazón poroso. Las ventajas de este método son:

- Para un determinado peso los paneles sándwich son más rígidos que los sólidos.
- Casi están completamente libres de efectos de orientación y la contracción es uniforme.
- Se pueden realizar secciones de espesor elevado sin que aparezcan depresiones superficiales.

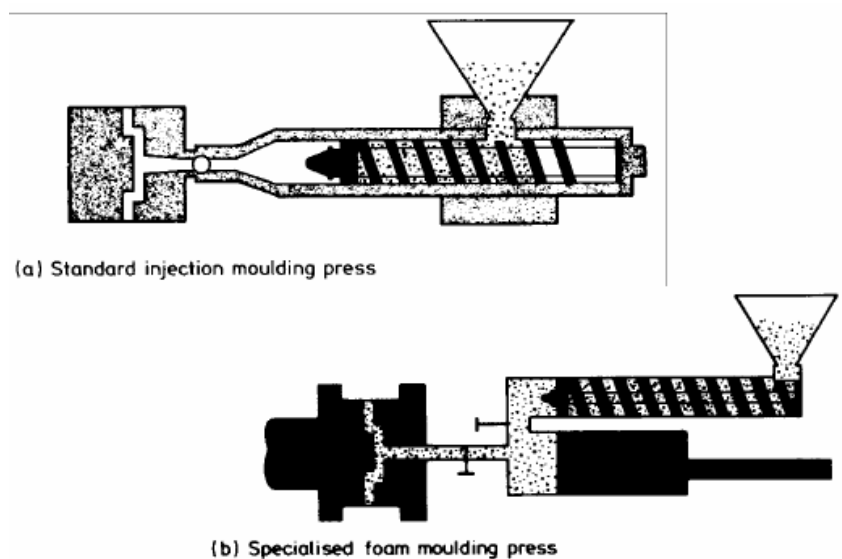


Figura 22. Máquinas de inyección para la fabricación de espumas estructurales

Las espumas estructurales pueden fabricarse, con buenos resultados, usando las máquinas de inyección normales como el de la figura 22 (a). Sin embargo, las limitaciones de la cantidad de alimentación en cada ciclo, la velocidad de inyección y el área de las placas impuestas por las máquinas convencionales impiden realizar la posibilidad que tienen las espumas estructurales de producir piezas de gran tamaño. Por ello, se han desarrollado máquinas especiales para la fabricación de piezas de más de 50 Kg como el de la figura 22 (b).

Las secciones de las paredes en el moldeo de espumas estructurales tienen mayor espesor que el caso normal. Esto, unido a que la conductividad térmica de la espuma es más baja, hace que el tiempo del ciclo de moldeo sea mayor. En contraste, las presiones de inyección son menores. Esto significa que las fuerzas de apriete son más pequeñas y los moldes serán más baratos debido a que para su fabricación se pueden usar materiales de menor resistencia.

Los paneles tipo sándwich formados por dos sistemas de polímeros distintos (o dos formas distintas del mismo polímero) sólo pueden ser producidos usando maquinaria muy especializada.

Como la parte importante del sándwich es la piel exterior, para ésta se usa un material de altas características (caro) y para el núcleo central uno de bajo coste o reciclado.

En primer lugar, se inyecta el volumen de polímero que se necesita para formar las capas superficiales (piel), quedando parcialmente lleno el molde. El polímero que constituye el núcleo es inyectado a continuación y fluye en régimen laminar por el interior del molde, hasta que se llena la cavidad como muestra la figura 23 (c).

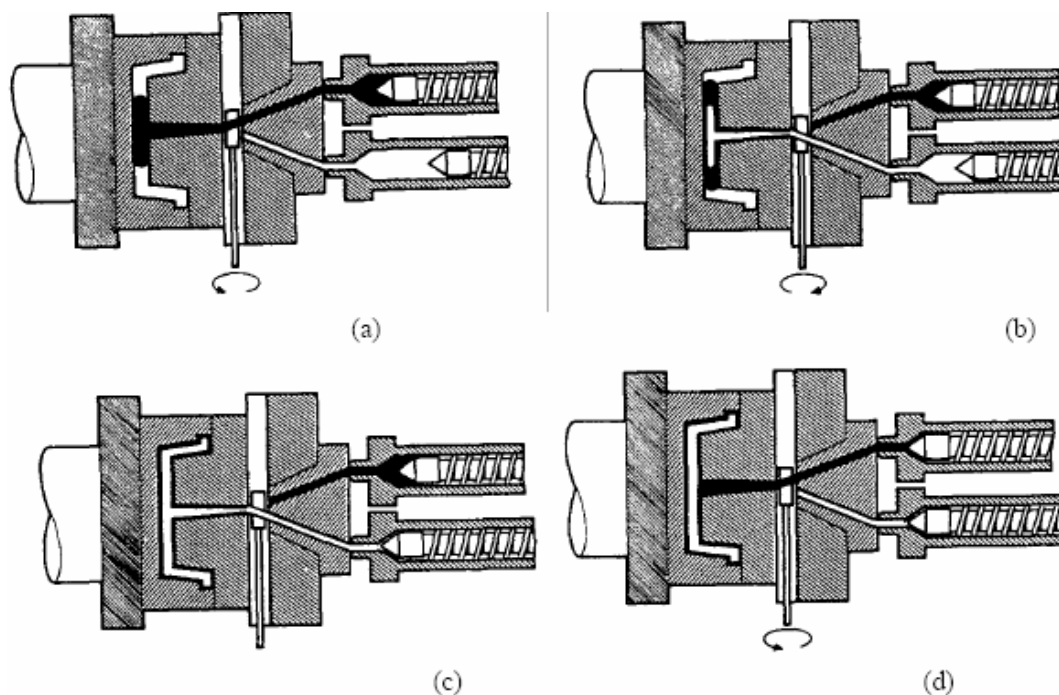


Figura 23. Etapas del proceso de moldeo por inyección de una estructura tipo sándwich

Finalmente, la válvula de la boquilla gira de tal modo que se inyecta de nuevo el material que constituye la capa superficial, para limpiar la cavidad de entrada al molde de material del núcleo y quedar así el molde preparado para la siguiente pieza.

Para conseguir un óptimo rendimiento con un coste relativamente pequeño, el material que constituye la capa superficial es normalmente un polímero de alta calidad, mientras que el polímero que constituye el núcleo es normalmente un plástico barato (que puede estar espumado o no). Sin embargo, para algunas aplicaciones, el material del núcleo resulta crítico. Esto se presenta en piezas para ordenadores, equipos electrónicos y algunas partes de los automóviles. En estas aplicaciones hay una demanda creciente de tapas y cajas que contengan un relleno conductivo, que es caro, para satisfacer los requerimientos de protección de interferencias electromagnéticas (EMI).

3.4.2. Moldeado por inyección con gas (RIM)

Los materiales huecos pueden ofrecer ventajas similares a los de los paneles tipo sándwich en el sentido de que se mejora la rigidez estructural y se reduce peso. Sin embargo, hasta hace poco tiempo la producción de materiales huecos sólo era posible utilizando diseños muy complicados en los moldes y utilizando en el núcleo materiales fusibles o “renovables”. El moldeado por inyección con gas ofrece una alternativa.

Moldear por inyección química, RIM (Reaction Injection Moulding), difiere del moldeo compacto por inyección común en que se usan resinas líquidas reactivas en vez de un polímero fundido. No hay extrusor, sino un sistema de almacenamiento y suministro de las resinas reactivas. Por lo común, hay dos componentes que reaccionan químicamente en forma espontánea cuando se mezclan. Éstos se dosifican y se mezclan justo antes de inyectarlos en el molde.

Por lo común, el sistema químico es de poliuretano, aunque actualmente se investigan algunos otros. Los poliuretanos y sistemas relacionados, como las poliureas, dan buenos resultados cuando se usan en el proceso y se adaptan muy bien entre ellos, por lo que se pueden hacer variaciones para lograr objetivos diferentes.

El procedimiento del moldeo por inyección con reacción se efectúa a temperaturas bajas y las presiones de inyección son bajas debido a que los reactantes tienen una viscosidad baja. Nominalmente se requiere mantener calientes los sistemas de almacenamiento y circulación. La circulación es continua y con ello se mantienen homogéneos los componentes. Cuando se requiere una carga, se abre una válvula de pistón que admite cantidades precisas de los dos componentes.

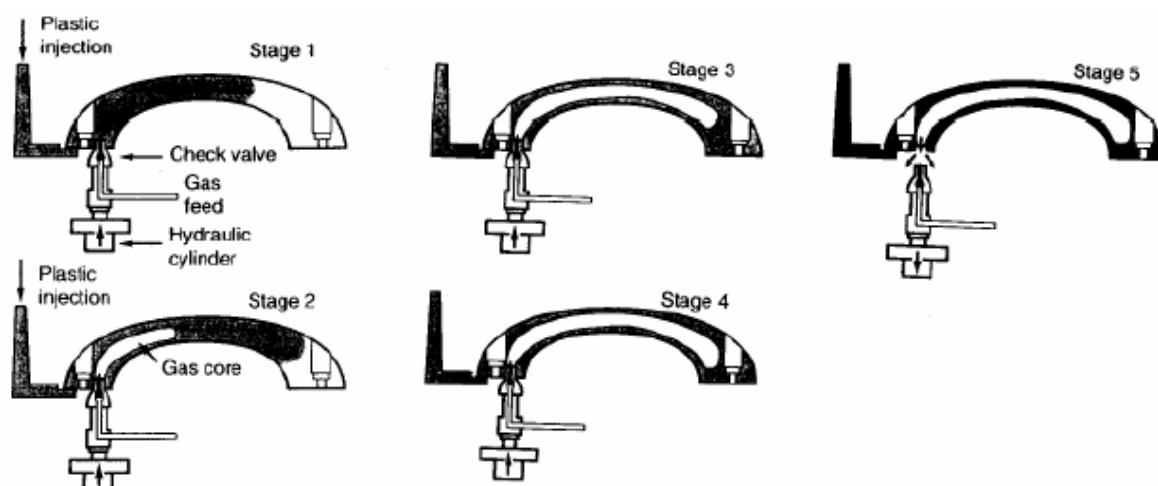


Figura 24. Moldeo con inyección de gas de una manilla de automóvil

Con los sistemas de alta presión, que se crearon en años recientes para producir partes de automóvil, el interés inicial se hallaba en las partes que absorben los choques en las defensas, pero recientemente se volvieron importantes los paneles de la carrocería y las molduras de carátulas de instrumentos internos. Al principio hubo dos desventajas: las molduras eran muy diferentes en su expansión térmica de las

partes de acero a las cuales se adherían y no podían tolerar, sin colgarse, las temperaturas a las que se horneaba la pintura. El refuerzo con fibras de vidrio cortas (2 mm) proporcionó una mejora útil en ambas propiedades y el proceso de moldeo por inyección con reacción y refuerzo ganó importancia en el campo de los paneles de carrocería.

El proceso comienza con la inyección del volumen deseado de polímero en el interior del molde. A continuación, una cantidad predeterminada de gas se inyecta y a medida que la parte exterior del producto se enfría por contacto con las paredes del molde, el gas fluye a través de la región central (menos viscosa). Cuando el producto ha enfriado totalmente en el molde, se abre éste y el gas que ha quedado retenido en el núcleo de la pieza se abre camino quedando hecho un producto hueco.

3.4.3. SCORIM: Shear Controlled Orientation in Injection Moulding

El proceso de moldeo por inyección convencional puede dar lugar a la formación de líneas de “soldadura” donde convergen los dos frentes de avance del polímero fundido. Estas áreas son especialmente frágiles y han de evitarse en la medida de lo posible.

Una solución que ha sido desarrollada en los últimos años es el proceso SCORIM. Este proceso lleva consigo el uso de pulsos de presión a través de numerosas cavidades de entrada que hacen que se mantenga en circulación el polímero fundido una vez que el molde está lleno. Esto se consigue con el uso de pistones hidráulicos al comienzo de cada canal de salida de la máquina, los cuales son accionados alternativamente para conseguir mover el polímero fundido dentro del molde. Después de transcurrido un tiempo predeterminado, los dos pistones se usan para proporcionar presión adicional de empuje.

Este proceso proporciona las siguientes ventajas:

- Se eliminan las líneas de soldadura y, por tanto, las discontinuidades mecánicas.
- Reduce la posibilidad de la presencia de depresiones superficiales debidas a un enfriamiento diferencial.
- Se produce una orientación de la estructura molecular o para productos reforzados con fibras un alineamiento de las fibras, con lo que se mejoran las propiedades mecánicas.

El principal inconveniente de esta técnica es el incremento de coste de la máquina de inyección y el aumento de la complejidad del sistema de control del proceso. Sin embargo, lo anterior puede ser compensado por una mayor calidad de los productos obtenidos, en particular para los de gran volumen y/o de alta calidad (altas prestaciones). Esta tecnología está disponible bajo licencia de la empresa Cinpres Ltd.

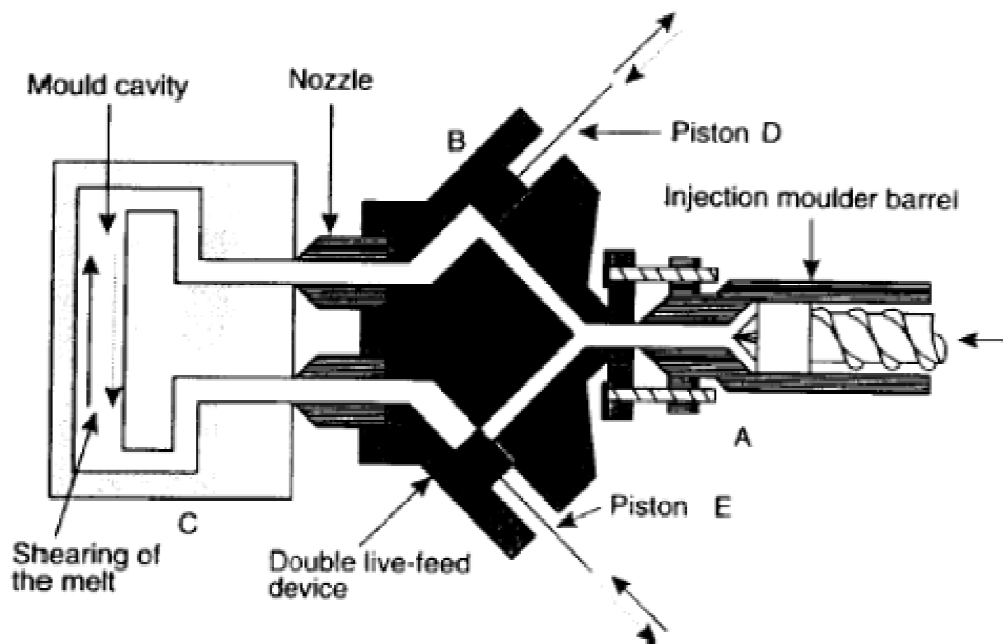


Figura 25. Representación esquemática del proceso SCORIM

3.5. Algunos aspectos de la calidad del producto

3.5.1. Fundamentos de la respuesta del material

Puede considerarse al procedimiento de moldeo por inyección como una trilogía cuyos componentes son la unidad de inyección, el molde y el polímero.

Se trata de estudiar el comportamiento del material durante su tratamiento y sus efectos sobre la calidad del producto.

Los principales parámetros de control del proceso son:

- La temperatura del material fundido
- La temperatura del molde
- La presión de inyección y la presión de retención
- La velocidad de inyección
- La distribución del tiempo para las diversas partes del ciclo del proceso

Se evitan algunas dificultades mediante un buen diseño del producto y del molde en primer lugar, y conviene entonces considerar algunos de estos aspectos antes de pasar a estudiar los efectos de los factores de control del proceso.

3.5.2. Aspectos de diseño

El desarrollo de nuevas tecnologías ofrece amplias ventajas tanto a la hora de diseñar el molde como de seleccionar el polímero.

Diseño del molde por computadora

Un avance importante de los últimos años es el uso de los métodos de diseño por computadora, iniciado por la compañía Moldflow. El banco de datos del sistema contiene datos reológicos, de temperatura y de presión de varios polímeros. Con la computadora se puede simular un diseño del molde que se proponga y analizar el flujo de material fundido en él. Pueden probarse diversos tamaños y posiciones de bebederos y compuertas hasta encontrar los óptimos. La técnica es muy valiosa para los complejos moldes de cavidades múltiples, donde el patrón de flujo puede ser difícil si no imposible de predecir. Tradicionalmente, se elaboraban esas herramientas con canales subdimensionados que luego se ajustaban en la planta mediante métodos de prueba y error, lo cual es un procedimiento laborioso y caro. El programa de Moldflow permite la simulación de pruebas y la fabricación directa de un molde perfecto.

Selección del polímero

El tema de la selección del polímero correcto para un uso determinado es complejo. Realmente no es posible obtener una guía completa y en gran parte depende de la experiencia individual y, por lo común, se encuentra que varios polímeros trabajan igualmente bien. En esos casos, la decisión final depende del costo y de las preferencias del productor. Sin embargo, una vez más, el surgimiento de los ordenadores hizo posible un diseño por computadora para este problema. Se usan bancos de datos que contienen las propiedades generales, mecánicas, eléctricas, etc. de muchos polímeros. De éstas se escogen las que igualen los requerimientos de diseño del producto, y se seleccionan los materiales adecuados mediante el ordenador.

Entre los problemas de calidad que pueden reducirse con frecuencia por medio del diseño se pueden enumerar los siguientes:

- **Líneas de soldadura.**

Éstas se forman donde se encuentran los flujos de polímeros y algunas veces pueden evitarse. Si son inevitables las soldaduras, por lo común se pueden mover a una posición en donde sean poco importantes gracias al control de la posición de la compuerta.

Una vez que el diseño reduce el problema, puede aplicarse el control del proceso para disminuir el efecto. Esto significa asegurar temperaturas y presión adecuadas para una buena soldadura. Una soldadura es siempre una trampa potencial de aire, debido a la convergencia de los frentes de fusión, de modo que en este punto puede requerirse sacar el aire.

- **Marcas de hundimientos y huecos.**

Estos defectos de moldeo se producen cuando la sección del producto es demasiado gruesa. La parte gruesa retiene calor y se hunde por las fuerzas de contracción, especialmente durante la cristalización en la que hay un gran cambio de densidad. Si se endurece la capa exterior y, entonces, resiste un posterior hundimiento, se forman huecos internos cuando se excede la resistencia a la tracción del material fundido en proceso de solidificación. Este es principalmente un problema de diseño, por lo que se evitan tanto como sea posible las secciones gruesas, pero puede ayudar un control cuidadoso de la presión de retención.

Cuando se requieren secciones gruesas en una pieza moldeada, por ejemplo, para darle rigidez, es mejor usar un procedimiento modificado como el del moldeo en núcleo de espuma, que evita el problema de hundimiento y de formación de huecos a la vez. Como una opción, se puede usar un patrón de costillas de sección delgada.

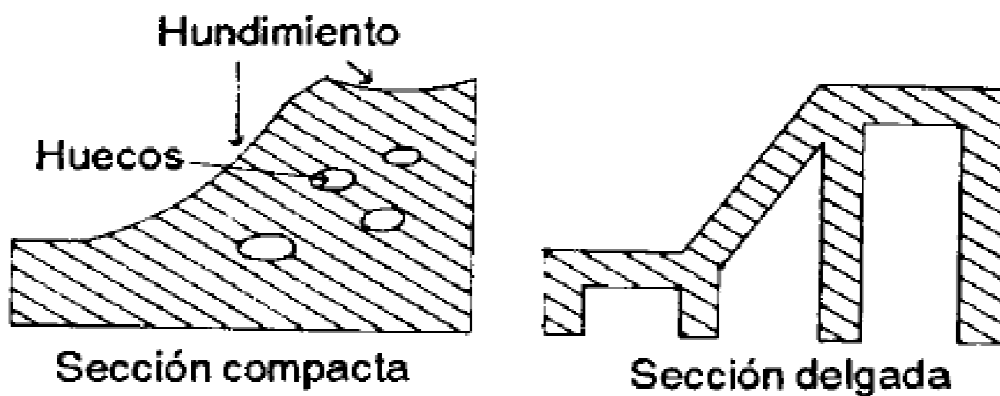


Figura 26. El uso de costillas en vez de una sección sólida

- **Concentraciones de esfuerzos en esquinas que conducen a la falla del producto en servicio.**

La consecuencia de las concentraciones de esfuerzos en piezas moldeadas con esquinas agudas puede ser por lo común, la fractura, especialmente si el producto soporta carga. Algunas veces es la distorsión presente cuando se usan polímeros reforzados con fibra.

En la figura 27 se ilustra lo anterior y se muestran algunas características de diseño que pueden ayudar.

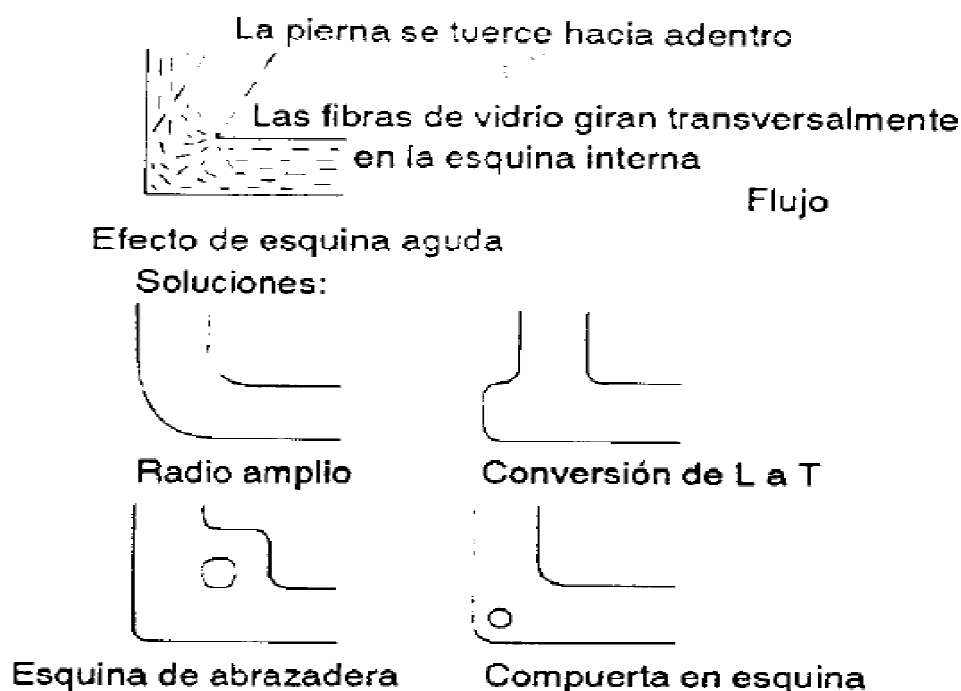


Figura 27. Características de diseño para evitar los efectos de las esquinas agudas

3.5.3. Efectos de la presión y del calor debido a esfuerzos de corte

En los bebederos estrechos de un molde de inyección, la velocidad de corte es de unos 10^3 s^{-1} y en el estrechamiento de la compuerta es del orden de 10^5 s^{-1} . El sistema total, desde luego, funciona sólo debido a que el polímero se comporta pseudoplásticamente.

Otro efecto de los esfuerzos de corte es la generación de calor, que es un aspecto importante del calentamiento del polímero conforme avanza en el barril o camisa. Así, durante la inyección, la temperatura se eleva en proporción a la caída de presión que hay conforme el material fundido se mueve a través de los canales: la temperatura aumenta aproximadamente 1°C por 1 MPa de caída de presión. Además, conforme se presuriza el material fundido, se produce un efecto de la presión sobre la viscosidad. El efecto consiste en incrementar la viscosidad, y este efecto se considera equivalente al incremento en la viscosidad que se observa al enfriarse, o sea, puede considerarse a la presión como una “temperatura negativa” equivalente. La magnitud es de nuevo del orden de -1°C por MPa de incremento de presión.

Así, para modificaciones en las condiciones del flujo de corte, los efectos del calentamiento debido al esfuerzo cortante y de la presión son opuestos y se cancelan aproximadamente uno a otro. Como regla, puede decirse que se obtiene un mayor error si se toma en cuenta sólo uno u otro que si se ignoran ambos.

3.5.4. Orientación

Uno de los aspectos más importantes en el moldeo por inyección es la orientación del polímero al entrar en la cavidad del molde y después, cuando solidifica. En los productos obtenidos por extrusión, por lo común se desea esta orientación que intensifica las propiedades, pero en el moldeo por inyección es un problema. Entonces, lo normal es minimizar la orientación, pero esto tiene que balancearse contra el factor económico de utilizar ciclos rápidos de moldeo, lo cual a su vez representa un enfriamiento rápido de las piezas moldeadas y la consiguiente congelación de las distribuciones orientadas.

Las moléculas de polímeros en su forma normal, en estado relajado, existen como cadenas enmarañadas; cuando se aplica presión al polímero fundido las cadenas tienden a “desenredarse” y a orientarse paralelamente a la dirección de flujo, lo cual permite a las moléculas deslizarse más fácilmente unas sobre otras. Esta acción de corte de una capa de polímero fundido sobre otra capa es lo que causa la orientación.

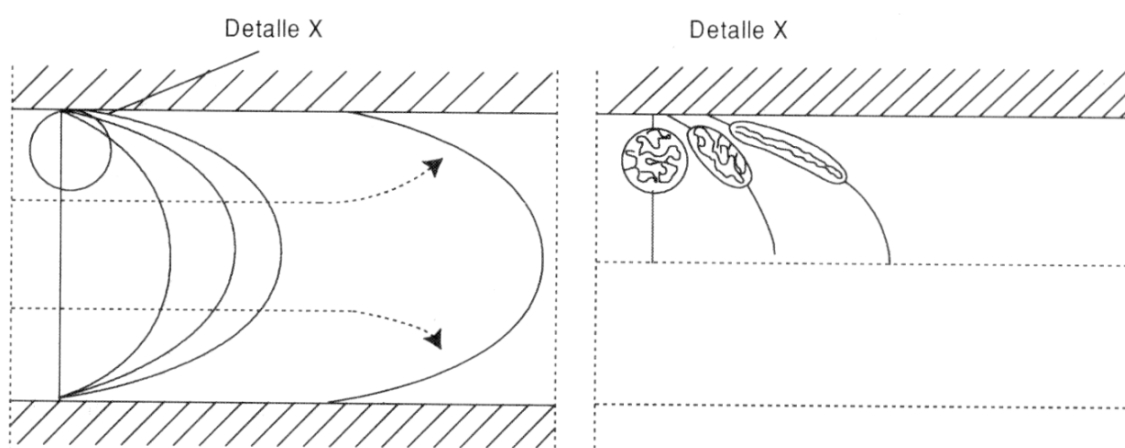


Figura 28. Orientación de cadenas durante el flujo de polímeros

Al cesar el esfuerzo y si se mantiene el polímero fundido por un tiempo suficientemente largo, las moléculas tienden a recobrar su forma original enrollada, debido a movimientos térmicos (movimiento browniano). A este proceso se le llama relajación. Sin embargo, en procesos tales como el moldeo por inyección, las moléculas no tienen el tiempo suficiente para regresar completamente a su forma original, es decir, no tienen oportunidad de relajarse de forma total. A la orientación residual que permanece en la pieza se le conoce como tensiones o deformaciones congeladas.

Si la orientación es marcada, en especial con polímeros cristalinos, estas tensiones podrían provocar la distorsión de las piezas moldeadas, ya sea con lentitud si los esfuerzos se alivian espontáneamente, o con rapidez si el material se somete a temperaturas de servicio elevadas.

Al encontrarse las moléculas del polímero más alineadas en una dirección que en la otra, las propiedades en la pieza son diferentes en las dos direcciones, es decir, el producto presentará propiedades anisotrópicas. El material será más fuerte (presentará mayor resistencia) en la dirección de flujo, debido a que las fuerzas de enlace carbono- carbono son mucho más fuertes que las fuerzas de atracción entre cadenas vecinas.

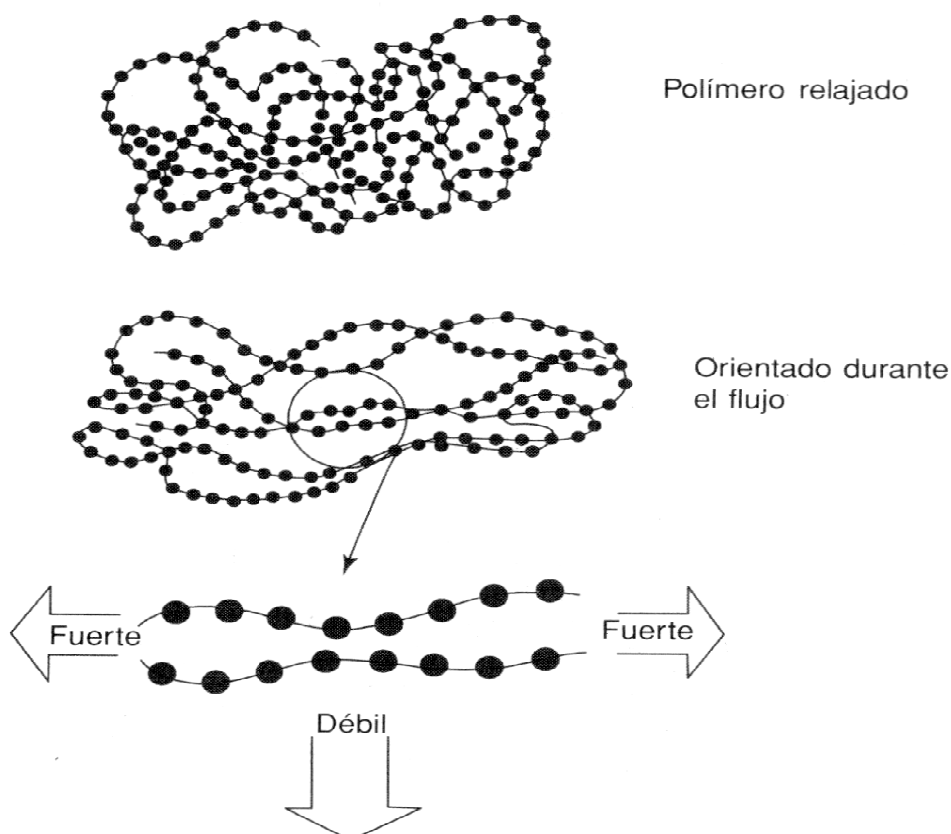


Figura 29. Anisotropía provocada por la orientación de cadenas

El molde produce un gran efecto en la orientación. Cuando el polímero fundido es forzado a entrar en él y hace contacto con las paredes, se solidifica.

A pesar de la orientación causada por el flujo a través de la entrada, la turbulencia es suficiente para que la primera capa de polímero solidifique sin orientar. Por lo tanto, la superficie del polímero inmediatamente adyacente a la superficie del molde tendrá un bajo grado de orientación, pero aquellas capas cercanas a la superficie estarán bastante orientadas, debido al rápido enfriamiento que sufren.

Por otro lado, las regiones del centro que tendrán más tiempo para que ocurra la relajación (permanecen más tiempo calientes) se encontrarán menos orientadas. Esto conducirá a que se forme un gradiente de orientación a través del espesor del artículo moldeado, con bajos niveles de orientación en el centro y niveles mayores a ambos lados del centro. Este gradiente de orientación variará con las condiciones de procesado y el tipo de material.

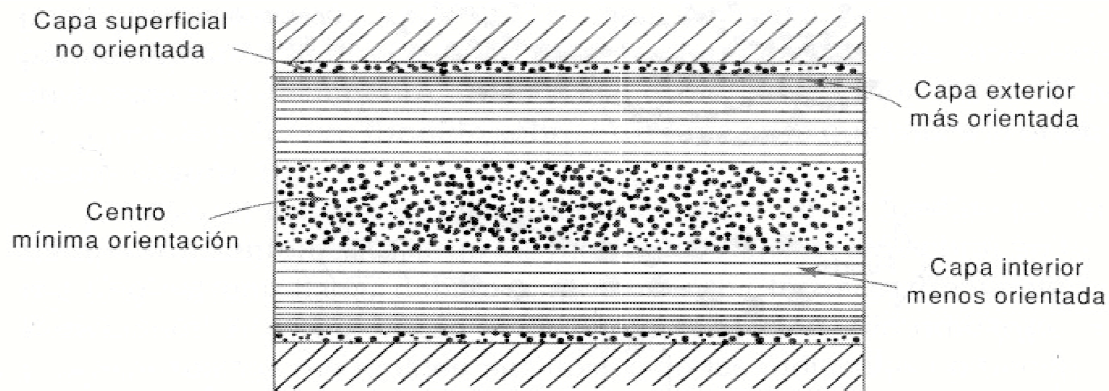


Figura 30. Gradiente de orientación en una pieza moldeada

¿Cuáles son los patrones de orientación que se encuentran normalmente? Un ejemplo simple sería una pieza moldeada rectangular con compuerta terminal.

- Cuando el material fundido entra al molde hay poca orientación. Conforme el material se pone en contacto con la pared del molde, se genera una capa de baja orientación.
- La mayor parte del flujo es laminar y altamente orientado. Así, dentro de la capa delgada, aparece una capa de alta orientación.
- El centro puede estar menos orientado debido a que permanece caliente, aislado por las capas externas que son muy grandes para reconocerse.



Figura 31. Patrón de orientación de una pieza moldeada

En la figura 31 se puede ver otro patrón de orientación, quizá en una pieza moldeada de gran tamaño. En la compuerta estrecha puede producirse patrones de alta orientación bajo condiciones de alto esfuerzo, y puede iniciarse la cristalización gracias al esfuerzo; ésta puede dar lugar a núcleos que controlarán el patrón de cristalización en la pieza moldeada conforme se enfría. Además, el flujo divergente puede generar esfuerzos tangenciales de tracción que deforman o agrietan la pieza moldeada.

En cuanto a la **medida de la orientación**, el estudio de la misma se hace mediante birrefringencia, en piezas moldeadas de plástico transparente, y consiste en colocar piezas entre dos filtros polarizados en medio de una fuente de luz blanca; cuando uno de los filtros se rota, aparece una serie de franjas o bandas de colores. Al examinar el artículo moldeado con luz polarizada, se encuentra que la orilla se ve negra, indicando que no existe orientación en esa posición, y moviéndose a lo largo de una línea, hacia la entrada, se ve una franja amarilla, a continuación una roja y después una verde.

Este grupo de tres franjas se conoce como “Primer orden”, el grupo siguiente como “Segundo orden” y así de modo sucesivo. Usualmente se cuenta el número total de órdenes y éste se utiliza para indicar el grado de orientación total. La posición de máxima orientación se muestra en general como una franja casi circular, la cual normalmente está localizada entre el centro del artículo moldeado y la entrada. Después de alcanzar la posición de máxima orientación, la secuencia de colores aparece en sentido inverso a medida que disminuye la orientación.

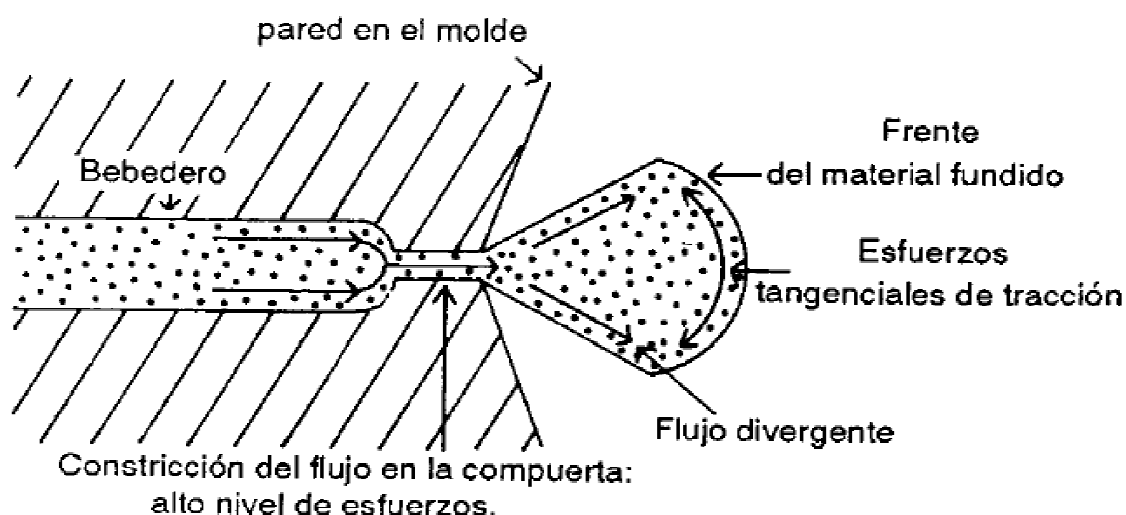


Figura 32. Efectos de la orientación en el frente de fusión

De acuerdo con lo expuesto hasta ahora, la orientación es el resultado neto del alineamiento de las moléculas en una dirección (por efecto de los esfuerzos de corte) y la relajación de ese alineamiento. Por lo tanto, cualquier cosa que se haga para propiciar una mayor relajación dará como resultado una reducción en la orientación. Es importante considerar las siguientes condiciones de operación como factores que influyen en la orientación:

- Altas temperaturas del molde y del material disminuyen la orientación, pues a mayores temperaturas mayor es la oportunidad para que ocurra la relajación de las cadenas orientadas. Además, después de sacar la pieza del molde puede ocurrir una cantidad apreciable de relajación.
- La presión aumenta la orientación. Altas presiones dan lugar a altos esfuerzos y velocidades de corte, lo cual provoca una mayor orientación.

- El tiempo de compactación tiene un efecto importante en la orientación, debido a que mientras la entrada no se cierre, la presión del pistón provoca que el flujo continúe; es decir, se generan más esfuerzos de corte y mayor orientación, principalmente en el área de entrada. De manera usual, ésta es el área más orientada de la pieza, donde existe la mayor cantidad de orientación residual.
- El espesor de la pieza también influye en la orientación. Debido a la baja conductividad térmica de los plásticos, las paredes gruesas actuarán como aislantes de la zona central, la cual se mantendrá más tiempo caliente. Esto promoverá la relajación en esta zona, disminuyendo la orientación.
- Las velocidades de flujo (velocidad de inyección) son críticas. A mayor velocidad, más rápido se llenará la cavidad y cerrará la entrada. Una vez que el flujo se detiene, empieza la relajación, es decir, disminuye la orientación.

La tabla 4 y la figura 33 resumen gráficamente la influencia de las variables del molde y del proceso de inyección sobre la orientación.

Tabla 4. Efecto del molde y las variables de procesamiento sobre la orientación y la anisotropía

	ORIENTACIÓN	ANISOTROPÍA
Temperatura		
Alta temperatura del material	Disminuye	Disminuye
Alta temperatura del molde	Disminuye	Disminuye
Enfriamiento rápido de la pieza	Aumenta	Aumenta
Presión		
Alta presión de inyección	Aumenta	Aumenta
Tiempo de sostenimiento largo	Aumenta	Aumenta
Geometría		
Mayor espesor de la pieza	Disminuye	Disminuye
Entradas grandes	Aumenta	Aumenta
Otros		
Baja velocidad de llenado del molde	Aumenta	Aumenta

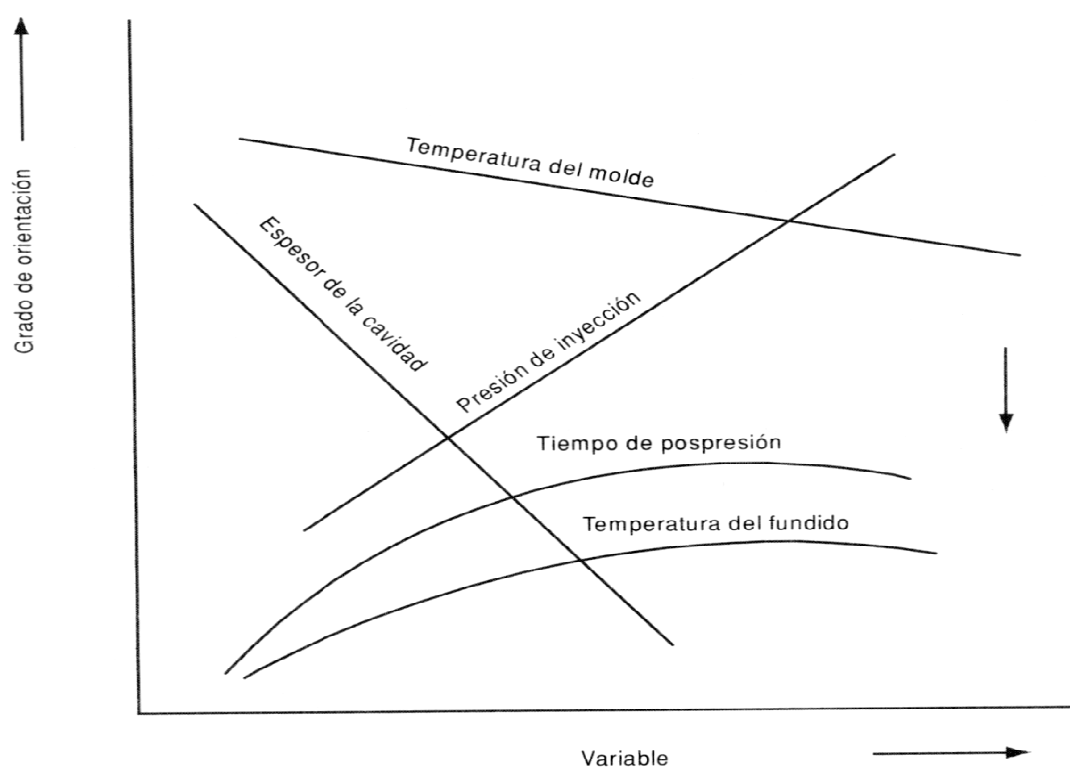


Figura 33. Efectos de las variables de inyección sobre la orientación

Generalmente, la orientación puede mejorar algunas propiedades en la dirección de flujo, pero a costa de reducir esta misma propiedad en dirección transversal, lo cual no es lo más conveniente. Lo que se requiere es una pieza que tenga buenas propiedades en todas direcciones.

En general, puede observarse que al aumentar la orientación, aumenta la resistencia de tensión, la elongación y la resistencia al impacto en la dirección de flujo. En la tabla se puede observar el efecto que tiene la orientación sobre algunas propiedades.

Tabla 5. Efecto de la orientación sobre algunas propiedades

PROPIEDADES	DIRECCIÓN PERPENDICULAR	DIRECCIÓN LONGITUDINAL
Resistencia a la tensión	Disminuye	Aumenta
Resistencia al impacto con muesca	Disminuye	Aumenta
Resistencia al impacto por caída de peso	Disminuye	Disminuye
Resistencia a la flexión	Aumenta	Aumenta
Fluencia	Disminuye	Disminuye

3.5.5. Contracción

Otro aspecto de gran interés para el fabricante de moldes es el de la contracción. La contracción es la diferencia de tamaño entre el molde y la pieza moldeada fría. La causa principal es el cambio en densidad que se produce cuando solidifica el polímero (contracción térmica).

Como se observa en la tabla siguiente, los polímeros cristalinos, por ejemplo, el acetal, el nylon, el polietileno de alta densidad, el polietilentereftalato y el polipropileno causan los problemas más serios con contracciones desde el 1 hasta el 4%.

Los polímeros amorfos, por ejemplo, el poliestireno, el acrílico y el policarbonato son más tratables, con contracciones de sólo 0,3 al 0,7%.

Tabla 6. Algunos valores aproximados de la contracción

Polímero	Porcentaje de contracción
Acrilonitrilo butadieno estireno	0.3-0.8
Acetal	0.0-2.2
Acrílico	0.2-0.8
Acetato de celulosa	0.5
Nylon 6,6	1.5
Policarbonato	0.6
Noryl	0.7
Polietileno de baja densidad	2.0
Polietileno de alta densidad	4.0
Polipropileno	1.5
Poliestireno	0.5
Cloruro de polivinilo no plastificado	0.3
Cloruro de polivinilo	1.0-5.0

Uno de los efectos inmediatos de la orientación es que también contribuye, de manera importante, a la contracción tanto en materiales amorfos como cristalinos. Normalmente, durante la inyección de una pieza, ocurre orientación como ya se ha expuesto anteriormente, alineándose las cadenas del polímero en la dirección del flujo; cuando el flujo cesa, estas cadenas tenderán a regresar a su forma “ovillada” normal. Al hacerlo, la pieza moldeada se reducirá en longitud en esa misma dirección, mientras que la contracción en dirección perpendicular a la línea de flujo será mucho menor. Esta contracción diferencial es una de las causas del alabeamiento o distorsión. El moldeador debe tener presente que una cierta contracción en la pieza es

inevitable, pero puede prevenir, al menos en parte, la contracción excesiva, controlando las condiciones de operación. Si las condiciones de procesado permiten grandes tiempo de relajación, esto dará lugar a mayor contracción principalmente en la dirección de flujo.

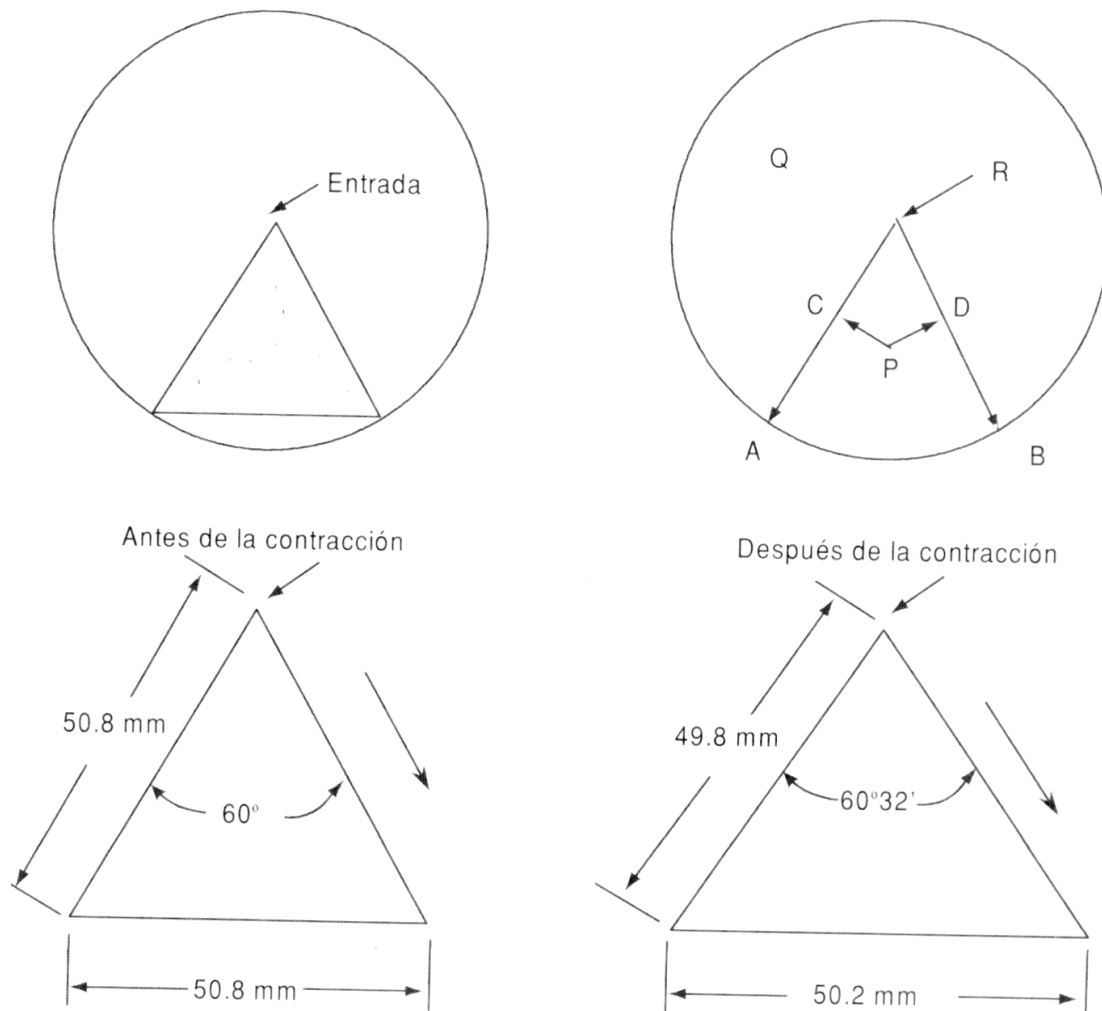


Figura 34. Contracción diferencial como causa de alabamiento de una pieza moldeada circular

En cuanto a la contracción térmica, en general, al aumentar la temperatura, se incrementa la movilidad de las cadenas y el volumen libre que existe entre ellas.

Un polímero cristalino experimenta un aumento considerable en volumen específico cuando funde su estructura cristalina, ya que los cristales ocupan menor volumen. Este cambio en volumen no es experimentado por los polímeros amorfos, por lo tanto, se contraen menos cuando pasan del estado fundido al sólido. En este caso, cuanto más alta es la temperatura del fundido y del molde, más grande será la contracción térmica que sufrirá el material al enfriarse, ya que el enfriamiento es más lento y permite más movimiento molecular y de los segmentos de las cadenas, lo cual aumenta la probabilidad de que las moléculas se ordenen y solidifiquen en un estado

cristalino, con lo que se tendrá, un mayor grado de cristalinidad. Es decir, en materiales cristalinos la contracción aumenta cuando se incrementa la cristalinidad, ya que la cristalización del fundido propicia una reducción del volumen de la pieza debido a un incremento de la densidad.

A continuación se expone el efecto que tienen algunas de las variables de proceso sobre la contracción de piezas moldeadas por inyección:

- **Efecto de la presión:** Durante el moldeo por inyección, la presión que se transmite a la cavidad influye directamente en la contracción que ocurre en la pieza moldeada. Cuando el molde se llena, la presión dentro del molde aumenta rápidamente, comprimiendo el material. Durante el enfriamiento de la pieza, su volumen disminuye y la presión de inyección empaqueta más material, compensando la reducción en volumen. Cuanto más gruesa sea la capa de material solidificado, menor será la contracción. A mayor presión, menor contracción.

Se puede decir que la variable más importante que afecta a las dimensiones de una pieza moldeada es la presión en el molde. Cuanto más largo sea el tiempo en que actúa la presión, mientras no se cierre la entrada, más material puede ser empaquetado en la cavidad y, por lo tanto, la pieza se contraerá menos.

- **Efecto de la temperatura:** A mayor temperatura del fundido, mayor será la contracción que ocurrirá en la pieza moldeada al enfriarse. Sin embargo, también el aumento de la temperatura da lugar a una disminución de la viscosidad, lo cual permite que la transmisión de presión a la cavidad sea mayor, permitiendo un mayor empaquetamiento de material; entonces, la presión más alta sobrepasa el efecto del aumento de temperatura, disminuyendo la contracción.
- **Espesor de la pieza:** Un mayor espesor de la pieza moldeada da lugar a que el material en el interior de ésta se enfríe más lentamente y origina más movimiento molecular y de los segmentos de las cadenas; aumenta la probabilidad de que las moléculas se ordenen y solidifiquen en un estado cristalino; se tendrá entonces un mayor grado de cristalinidad y, por lo tanto, mayor contracción.
- **Tamaño de la entrada:** Es necesario determinar cuidadosamente el tamaño de la entrada para asegurarse de que ésta no va a solidificar de manera prematura. Es decir, el material en la zona de entrada debe permanecer fluido el tiempo suficiente para que se transmita la presión de inyección adecuadamente, en caso contrario se dará lugar a altas contracciones.

El efecto de algunas variables de inyección sobre la contracción pueden apreciarse, de forma resumida, en figura 35 y tabla 7:

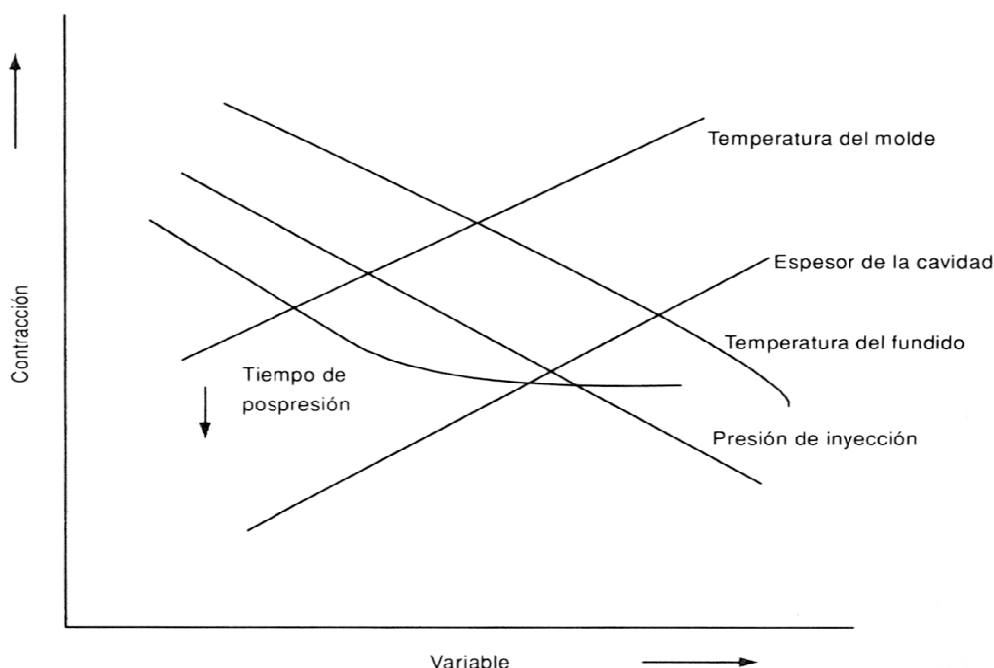


Figura 35. Efecto de las variables de inyección sobre la contracción

Tabla 7. Condiciones que afectan a la contracción

PARA DISMINUIR LA CONTRACCIÓN	
Temperatura	
Temperatura del fundido	Aumentar
Temperatura del molde	Disminuir
Presión	
Presión de inyección	Aumentar
Tiempo de pospresión	Alargar
Geometría	
Espesor de paredes	Disminuir
Tamaño de la entrada	Aumentar
Otros	
Velocidad de inyección	Aumentar
Ciclo total	Alargar

Por tanto, para obtener los mejores resultados se usa una combinación de factores de diseño y de control del proceso. Entre los factores de diseño se incluyen la selección de un polímero de baja contracción en caso de que sea importante la precisión dimensional. Son útiles los polímeros con relleno, especialmente los que contienen vidrio. Algunas veces esto no es posible, por ejemplo, para engranajes, los cuales requieren la resistencia que tienen los polímeros cristalinos a la fricción y al desgaste. No obstante, se requieren dimensiones precisas y es necesario “desviarse” ligeramente de las dimensiones del molde. Para que esto sea efectivo, la contracción debe ser completamente predecible, y esto requiere del diseño simétrico del producto y de un diseño de molde que asegure un flujo uniforme y simétrico. Por lo común, esto significa maximizar el área de la compuerta y colocar cuidadosamente las compuertas.

Los factores de control del proceso incluyen la reducción de la temperatura del molde y el uso de un programa óptimo de inyección, así como de velocidades y presiones adecuadas de retención. Lo mejor es usar la presión máxima para obtener un llenado rápido y mantener alguna presión de retención hasta que el material solidifique en la compuerta; esto también evita algunas otras fallas.

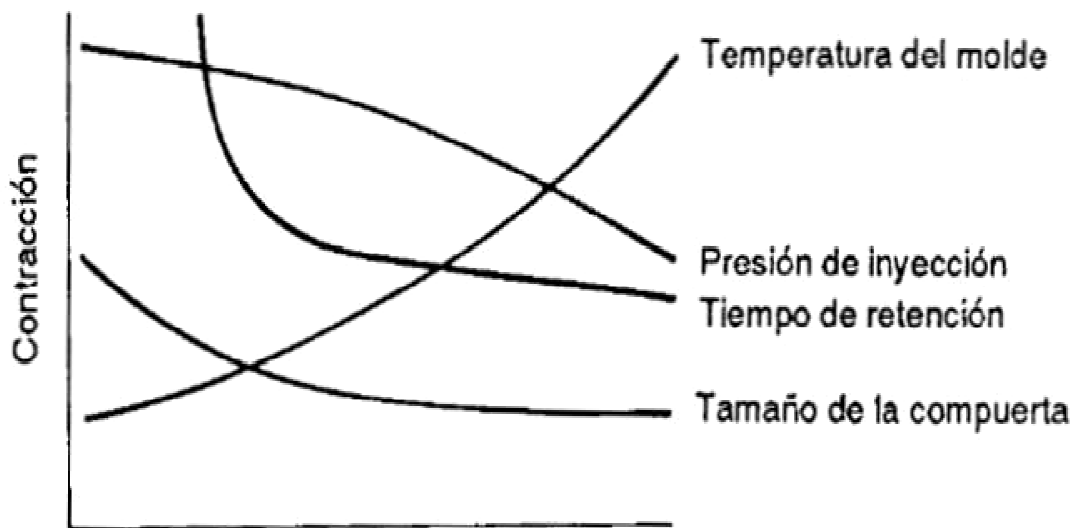


Figura 36. Efectos de las condiciones de tratamiento sobre la contracción

3.5.6. Alabeamiento

El alabeamiento o distorsión de una pieza ocurre sobre todo por una contracción no uniforme. Esto altera no sólo las dimensiones, sino también el contorno y ángulos de la pieza moldeada. Existen diversos factores que pueden ocasionar el alabeamiento:

- **Contracción diferencial.** Como ya se ha mencionado, las diferencias en contracción que ocurren, por efecto de la orientación, en una pieza moldeada, pueden provocar el alabeamiento o distorsión de ésta, sobre todo si la

geometría de la pieza no provee suficiente rigidez. Al reducir la orientación de la pieza se reducirá la contracción diferencial y por lo tanto el alabeamiento.

- **Diseño de la pieza.** En cuanto al diseño de la pieza, se puede señalar que, si se tienen espesores no uniformes, éstos tendrán distinta rapidez de enfriamiento y, por lo tanto, diferentes densidades y orientación. Por consiguiente, pueden crearse grandes tensiones internas cuando la pieza se enfría, lo cual dará lugar al alabeamiento de la pieza.
- **Diseño del molde.** Por otra parte, uno de los mayores problemas en cuanto al diseño del molde es la localización adecuada de la entrada, ya que una entrada mal situada puede provocar una orientación indeseable. Además, el enfriamiento no uniforme da lugar a diferencias en la orientación y en la densidad de la pieza, lo cual también es causa de alabeamiento en la pieza.

En el ejemplo esquematizado en la figura 34 se observa que una sola entrada (O) provoca una contracción diferencial (ya que la pieza se contrae más en la dirección de flujo, OA-OB, que en la dirección perpendicular a ésta, PC-PD), causando el alabeamiento. Por lo tanto, la solución a este caso es colocar otras entradas (P, Q, R), permitiendo tener una contracción más uniforme en la pieza y evitar así el alabeamiento.

La mejor manera de evitar el alabeamiento o distorsión por problemas de diseño del molde o de la pieza es rediseñar estos.

- **Condiciones de moldeo.** En general, cualquier condición que tienda a reducir la orientación hará que disminuya el alabeamiento.

Por ejemplo, un tiempo más largo de enfriamiento disminuirá el alabeamiento, ya que cuanto más rígida esté la pieza cuando se extrae del molde, menor posibilidad tendrá de que los esfuerzos se traduzcan en deformaciones. Mientras, temperaturas no uniformes en el molde darán lugar a diferencias en densidad en las distintas partes de la pieza, lo cual provocará una contracción no homogénea y, por lo tanto, suscitará el alabeamiento de la pieza moldeada.

- **Materiales.** Los materiales cristalinos presentan mayor contracción que los materiales amorfos. Sin embargo, una mayor cristalinidad da lugar a piezas con una mayor rigidez, lo cual permite menor alabeamiento.

Por otra parte, una distribución estrecha de pesos moleculares producirá un menor alabeamiento.

Aunque no existe una solución única al problema del alabeamiento, se sabe que cualquier condición que tienda a reducir la orientación permitirá reducir también este problema.

Tabla 8. Factores que influyen en el alabeamiento

ALABEAMIENTO	
Temperatura	
Alta temperatura del material	Disminuye
Alta temperatura del molde	Disminuye
Enfriamiento uniforme de la pieza	Disminuye
Enfriamiento lento de la pieza	Disminuye
Presión	
Alta presión de inyección	Aumenta
Tiempo largo de sostenimiento	Aumenta
Geometría	
Mayor espesor de la pieza	Disminuye
Espesores no uniformes	Aumenta
Estradas grandes	Aumenta
Otros	
Alta velocidad de llenado del molde	Disminuye

3.5.7. Perfil de inyección

Para todas las operaciones de moldeo, la optimización del ciclo de inyección compensa el esfuerzo que se hace para mejorar. Como mínimo, la optimización asegura el uso eficaz del material y genera pocos desperdicios; por lo común, ésta es la diferencia entre una pieza bien hecha y una defectuosa.

A continuación, el procedimiento de inyección se divide en dos secciones, a saber, llenar y empacar o retener. Llenar depende de la velocidad. Idealmente, llenar debería ser rápido, para permitir que la válvula de no retroceso funcione rápida y positivamente. Una máquina moderna que se puede programar permite variar la velocidad, por ejemplo:

- 1) Llenar rápido el sistema del canal de alimentación y bebedero.
- 2) Retardar para evitar que haya chorros a través de la compuerta.
- 3) Una vez que se empieza a llenar la cavidad principal, incrementar de nuevo la velocidad hasta que esté llena.
- 4) Disponer de posteriores variaciones de la velocidad para equilibrar los núcleos u otros estrechamientos en el molde.

Esta parte del programa relaciona velocidad con distancia. En este punto, se empieza a empacar. El programa cambia a presión contra tiempo. Se usa la presión correcta para llenar uniformemente el molde, pero evitar empacar de más, que generaría piezas moldeadas con esfuerzos residuales y sobrepeso. La presión con que se empaca puede variar a través del ciclo para evitar la fuga de material antes de que solidifique la superficie de la pieza moldeada, luego se incrementa para comprimir y eliminar los huecos y se baja para evitar los esfuerzos hasta que el material solidifique en la compuerta.

Para un nuevo producto, puede emplearse este programa recurriendo a la experiencia y a varias corridas de prueba. Para una moderna máquina que se controla con microprocesador, la información del programa puede entonces almacenarse en disco o cintas, y está disponible para usarse en corridas posteriores.

3.6. Problemas en el moldeo por inyección

En la tabla se dan algunos de los problemas que pueden aparecer en el moldeo por inyección, mencionando las causas y las posibles soluciones.

Tabla 9. Propiedades del moldeo por inyección

Dificultad	Causas	Posible remedio
Manchas, pintas o vetas negras	Exfoliación de plástico quemado en paredes del cilindro	Purgar cilindro calefactor
	Aire atrapado en molde causa quemaduras	Ventilar molde correctamente
	Quemaduras por rozamiento de gránulos fríos contra paredes del cilindro	Usar plásticos lubricados
Burbujas	Humedad en gránulos	Secar el granulado antes del moldeo
Rebabas	Material demasiado caliente	Reducir temperatura
	Presión demasiado alta	Reducir presión
	Línea de separación insuficiente	Rectificar la línea de separación
	Presión de sujeción insuficiente	Aumentar presión de sujeción
Acabado deficiente	Molde demasiado frío	Elevar temperatura del molde
	Presión de inyección demasiado baja	Elevar presión de inyección

	Agua en el molde	Limpiar molde
	Exceso de lubricante de molde	Limpiar molde
	Poca superficie sobre el molde	Pulir molde
Pieza moldeada, escasas dimensiones	Material frío	Elevar temperatura
	Molde frío	Elevar temperatura del molde
	Presión insuficiente	Aumentar presión
	Orificio de colada pequeño	Agrandar orificio de inyección
	Aire atrapado	Aumentar tamaño de ventilación
	Falta de equilibrio en el flujo del plástico al molde de varias cavidades	Corregir sistema de canales
Depresión superficial	Insuficiente plástico en molde	Aumentar velocidad de inyección, comprobar dimensión orificio de inyección
	Plástico demasiado caliente	Reducir temperatura del cilindro
	Presión de inyección	Aumentar presión
Combadura	Parte expulsada demasiado caliente	Reducir temperatura del plástico
	Plástico demasiado frío	Elevar temperatura de cilindro
	Demasiada corriente de alimentación	Reducir alimentación
	Desequilibrio en orificios de inyección	Cambiar posición o reducir orificios de inyección
Marcas superficiales	Material frío	Elevar temperatura del plástico o molde
	Inyección lenta	Aumentar velocidad de inyección
	Desequilibrio flujo canales de inyección y entradas	Reequilibrar orificios de inyección o canales

4. Aceros para moldes de inyección

En la producción para obtener grandes series de piezas tiene vital importancia la obtención de estas por el método de inyección. Dentro de este método de producción es importante el empleo de un molde metálico de larga duración y con el cual se podrán obtener grandes series de piezas idénticas.

Es por tanto sumamente importante una acertada elección del acero para la construcción del molde. Se puede decir que el coste del acero de un molde esta alrededor del 5 al 6% del coste total del molde, más un gasto adicional entorno al 3% para el tratamiento térmico. Teniendo en cuenta lo dicho, una buena elección del acero, aunque esto conlleve un aumento de presupuesto, puede mejorar considerablemente la vida del molde y, en consecuencia, la rentabilidad total del mismo.

Al observar el funcionamiento de una maquina de fundición a presión o inyectada, se puede deducir las exigencias de los aceros destinados a la fabricación de estos moldes. Estos deben resistir entre otros: la erosión, altas temperaturas y la fatiga por la erosión del metal fundido al incidir sobre la superficie del molde.

4.1. Factores que influyen en la elección del material del molde

Los principales factores que influyen en la elección del material del molde son:

- Tipos de plásticos que van a ser moldeados
- Método de moldeo
- Diseño de las partes a moldear (tamaño, forma, espesor, etc.)
- Cantidad de partes a hacer

Existen otro tipo de factores que influyen también en la elección del material, como las propiedades físicas y químicas del material del molde, o características en su fabricación como:

- Facilidad de ser fresado. Requiere un bajo recocido para que exista una baja dureza
- Maquinabilidad. Cuando el fresado no es posible o no es viable por motivos económicos, este debe ser trabajado por otros distintos procesos para su obtención
- Pulido. El pulido es de vital importancia a la hora de trabajar con moldes para plásticos, pues estos deberán tener una gran calidad superficial. Un buen acabado superficial, resistencia química y dureza de la superficie del molde son esenciales para obtener un buen acabado superficial de la pieza

- Resistencia al desgaste. La entrada de plástico en el molde, causa una apreciable cantidad de desgaste. Una buena resistencia por abrasión en la superficie del molde es imprescindible
- Alta dureza en la superficie. Es necesaria para una buena resistencia al desgaste y un buen pulido de la superficie
- Gran dureza y fuerza en la base del molde. Necesarias para soportar las grandes presiones a las que se realiza la inyección del plástico, y evitar el hundimiento o deformación.
- Resistencia. Los moldes deberán soportar gran cantidad de inyectadas y a gran velocidad, las cuales producen un continuo esfuerzo sobre el molde. El molde deberá resistir estos impactos, además de los cambios drásticos de temperatura que experimenta el plástico, pasando de caliente a frío en pocos segundos.
- Cambio en las dimensiones mínimas. Los plásticos experimentan una expansión al ser calentados y luego se contraen. Estos cambios dimensionales de la pieza se tendrán que tener en cuenta a la hora de diseñar el molde.
- Resistencia a la corrosión. Algunos plásticos son altamente corrosivos. Además hay que tener en cuenta que se trabajara en unas condiciones de alta humedad dentro del molde.
- Alta dureza y resistencia al desgaste en altas temperaturas. Tanto el molde como en plástico que se inyecta en el estarán a altas temperaturas. Se tendrá que tener en cuenta que se producirán desgastes superficiales con mayor facilidad al trabajar a altas temperaturas.

4.2. Aceros aleados

Los elementos de aleación más habituales son Ni, Cr, Mn, Mo, W, Si y V. Los efectos de estos elementos son:

- Varían las temperaturas de transformación
- Forman carburos
- Actúan sobre el crecimiento del grano
- Varían la templabilidad
- Mejoran las propiedades mecánicas (tenacidad, resistencia al desgaste, etc.)
- Aumentan la resistencia a la corrosión

Podemos clasificar los aceros aleados en:

- De construcción (aleantes <10%). Se caracterizan por la presencia de ferrita y perlita
- Microaleados ($0,03 < C < 0,08\%$)
- Inoxidables. Ferríticos (magnéticos y no templables). Martensíticos (magnéticos). Austeníticos (no magnéticos, soldables, deformables en frío y muy resistentes a la corrosión)
- Aceros de herramientas. De baja templabilidad, de alta templabilidad, rápidos (mantienen la dureza a temperaturas elevadas)

4.3. Aceros de herramientas

Normalmente el acero elegido para los procesos de producción por el método de inyección son aceros para herramientas. La elección de este acero para herramientas, debe estar basada en la correlación entre las propiedades tecnológicas del acero y los requerimientos que se precisan del molde. Debe tenerse presente que para la fabricación de un molde pueden utilizarse diversos tipos de acero de composiciones muy diferentes y que la elección del más adecuado de ellos depende en definitiva del coste o mejor dicho del presupuesto al que nos tengamos que ajustar o visto desde otro punto de vista del coste por pieza producida.

El coste, en definitiva, es función de muchos factores, entre los cuales pueden destacarse los siguientes: duración deseada del molde, precio del acero, facilidad de mecanizado del mismo, magnitud de la serie a producir, oscilaciones de tamaño y dimensiones del molde al ser sometido a los distintos tratamientos térmicos, como liberar tensiones, recocido.

Un ejemplo claro esto lo constituyen los aceros de herramientas al carbono, que a pesar de sus limitaciones en comparación con los aceros aleados, tienen un bajo precio y un fácil mecanizado, y como va a ser utilizado para la producción de series cortas, no importa que su duración sea limitada.

Los aceros al carbono son, por su composición, los aceros de herramientas más sencillos, pero no son aleaciones hierro-carbono puras, puesto que los aceros utilizados industrialmente tienen también cantidades de manganeso, silicio, fósforo, azufre, nitrógeno, etc., que se encuentran como impurezas y cromo, níquel, molibdeno.

Conviene elegir bien el proceso de temple que se ha de emplear en cada acero según su composición para obtener en el molde, una dureza superficial correcta y un núcleo tenaz sin demasiadas fuerzas internas.

Todo molde debe de tener una serie de propiedades tales como: dureza, resistencia al desgaste, resistencia a la compresión, resistencia a la fatiga, indeformabilidad, estabilidad al revenido, resistencia en caliente..., factores que deben tenerse muy en cuenta a la hora de elegir un tipo de acero.

Para evitar la sensibilidad al sobrecalentamiento del molde, y un crecimiento excesivo del grano, y la fragilidad que conlleva, se recurre a pequeñas cantidades de vanadio, del orden del 0,08 a 0,2%. También favorece el proceso de temple si fuera preciso, y la tenacidad del molde.

También en algunos casos como en piezas de grandes dimensiones en las que se necesita que la capa superficial sea dura y de un espesor considerable, como es el caso de un molde para procesos de inyección, o matrices para trabajo en frío, la adición de proporciones de cromo, entre un 0,2 y un 1%, permite obtener estas características.

4.3.1. Propiedades fundamentales

Los aceros utilizados en el molde se pueden clasificar dentro de los denominados aceros de herramientas, pues bien estos aceros a la hora de fabricación del molde sufren menos cambios dimensionales y tienen una serie de propiedades que son las adecuadas para el proceso de inyección de plásticos: que la superficie sea suficientemente dura y resistente a la compresión; que sea resistente al desgaste y tenga la superficie tenaz, para soportar las condiciones de trabajo a las que será sometido; que su vida útil o ciclo de trabajo sea lo máximo posible dentro de lo esperado.

- **Dureza y resistencia a la compresión**

La dureza en el acero es debida a la martensita de temple (solución saturada de carbono en Fe- α) de los distintos componentes estructurales y sus proporciones en la masa templada de un acero de herramientas se encuentran los carburos.

Los carburos son sustancias muy duras presentes en la masa del acero. La presencia de carburos esta manifiestamente probada siempre que el contenido en carbono disuelto en la austenita aumenta por encima del límite solubilidad necesario para que se forme después la suficiente martensita en el temple. Mediante la adición de aleoelementos tales como cromo, molibdeno, vanadio, wolframio, titanio, etc., el carburo de hierro, se transforma en otros carburos de dureza superior.

Además de tener una dureza suficiente, los aceros de herramientas no deben sufrir deformaciones permanentes ni tampoco romperse bajo las sollicitaciones y esfuerzos cíclicos a los que puede estar sometido. Por eso dichos esfuerzos deberán estar por debajo del límite de fluencia. Como estrecha relación que comparten, se puede decir que aumentando la dureza aumenta el límite a

fluencia y, por tanto, su resistencia a la compresión. Por lo tanto ajustando la dureza mediante el tratamiento térmico temple-revenido varían las demás propiedades.

- **Resistencia al desgaste**

La resistencia al desgaste es una propiedad difícil de analizar, ya que en ella afectan multiplicidad de mecanismos y factores; en cuanto a que un acero tenga una resistencia al desgaste optima, depende de la cantidad de carburos presentes, y también, de su dureza después de ser templado y revenido. El desgaste es un fenómeno consecutivo al rozamiento o fricción en seco entre el molde y el material inyectado, en nuestro caso, que se traduce en una degradación superficial de las partes activas, esencialmente, por dos mecanismos diferentes:

- **Desgaste por adhesión.** Mecanismo de fricción entre dos superficies de contacto cuyo resultado es la soldadura local o gripa (micro soldaduras), con rotura de las uniones de fricción y desprendimiento de partículas de la superficie menos dura. El método más eficaz para evitar o reducir el desgaste por adhesión es la lubricación.
- **Desgaste por abrasión.** Proceso relativamente constante en el tiempo y unido a un gradual arranque y desprendimiento de partículas duras que pueden ser bien de los abrasivos contenidos en el material a conformar, o bien de partículas de origen adhesivo. El desgaste está estrechamente relacionado con el coeficiente de rozamiento entre el molde y el plástico inyectado en el molde, ya que el desgaste es un fenómeno superficial.

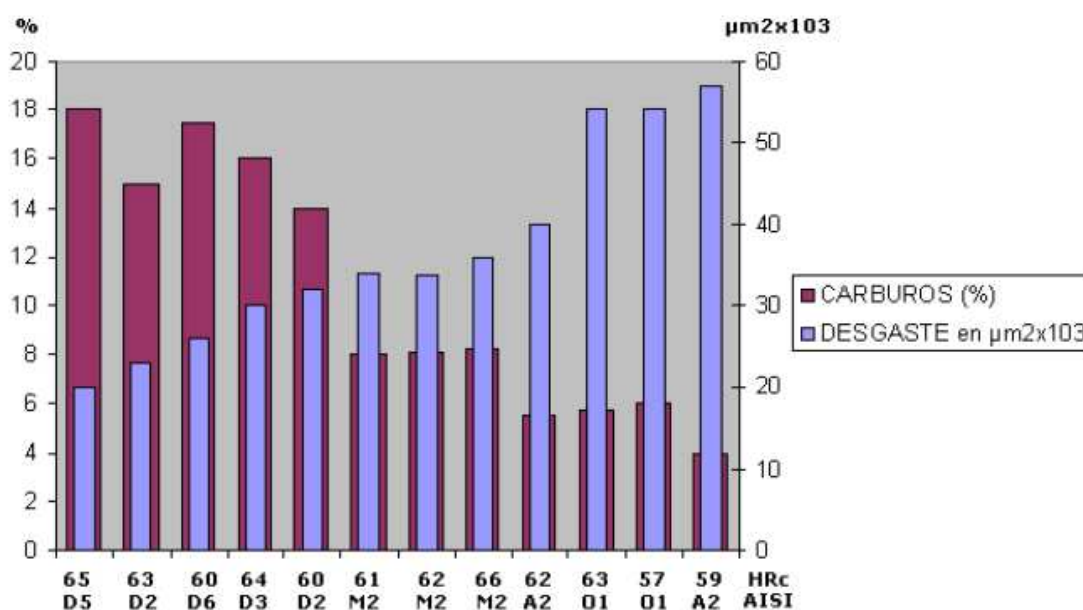


Figura 37. Gráfico relación % carburos, dureza y desgaste

Por consiguiente, para incrementar la resistencia al desgaste en un molde, hay que templearlo a la máxima dureza teniendo en cuenta también el tamaño, naturaleza y forma de los carburos.

Aunque la estructura de temple más revenido, y la composición química del acero, son factores importantes en la capacidad de resistencia al desgaste; podemos decir, que el efecto combinado de la dureza más elementos de aleación contribuyen de una manera muy significativa al aumento de la resistencia al desgaste de los aceros de herramientas en general. Se ha observado en los estudios topográficos de las superficies desgastadas, mediante la utilización de un perfilómetro óptico, que la distribución de la dureza, la forma, y el volumen de los carburos en la estructura del acero templado mas revenido, contribuye de una manera decisiva en la resistencia al desgaste.

- **Tenacidad**

Se entiende por tenacidad la capacidad que tiene el elemento a contrarrestar la rotura. La energía de choque que se produce al inyectar el plástico en el molde debe compensarse más elásticamente que plásticamente. Esto hace que el molde necesite tener un límite elástico o limite de fluencia elevado. Aunque también es necesario que el molde tenga cierta plasticidad para evitar la formación de grietas con los continuos cambios elásticos.

La tenacidad depende de la estructura alcanzada por tratamiento térmico, y de la composición química del acero utilizado. Alto contenido en carbono y gran cantidad de carburos implica una elevada dureza y alta resistencia al desgaste del acero, pero disminuye muy significativamente la tenacidad después del templado; es decir, los materiales muy duros carecen, en gran medida, de tenacidad.

4.4. Tratamientos térmicos de los aceros de herramientas

Una de las últimas operaciones en el proceso de fabricación de moldes y herramientas hechos de aceros de herramientas, es el tratamiento térmico. Los valores experimentales y teóricos, permiten asegurar las propiedades deseadas mediante un tratamiento térmico específico.

Recocido de eliminación de tensiones

Después del mecanizado oportuno de las piezas, estas se someten a un recocido entre 600 y 650°C, con el que se suprimen las tensiones, que pueden producir cambios de la forma de la pieza, fisuras y grietas durante el temple.

Temple

La baja conductividad térmica de los aceros de herramientas, condicionan un calentamiento hasta la temperatura de temple lento para que las tensiones no aumenten. Un calentamiento muy rápido puede producir deformaciones y grietas.

El tiempo a temperatura de temple, es decir, tiempo de austenización, dependerá de la masa y volumen de la pieza a tratar. Este no debe ser más de lo debido, el justo para que se disuelvan una cantidad suficiente de carburos y la austenita disponga de suficiente carbono para obtener una dureza después del temple.

La temperatura de temple dependerá de la composición del acero, así como de la forma y dimensiones del molde a tratar. Los valores de enfriamiento, severidad de temple y velocidad crítica de temple, se tomarán según el comportamiento de transformación que tenga el acero de herramientas elegido, así como el tamaño del molde.

Por el peligro que existe de aparición de grietas, debido a las tensiones de temple, la velocidad crítica de enfriamiento debe ser la mínima exigida. Sin embargo, la severidad de enfriamiento debe de ser lo más alta posible para que el temple alcance a toda la masa del molde, lo que se llama templabilidad máxima. El temple por tanto, debe realizarse de forma que se obtenga la dureza deseada sin que el enfriamiento sea demasiado enérgico. El aceite de temple debe tener una temperatura comprendida entre 50 y 80°C.

Revenido

El temple le da a la pieza dureza, pero a la mismo vez fragilidad. Si volvemos a calentar la pieza durante un tiempo se obtiene mayor dureza y tenacidad.

Aunque la principal virtud del revenido, es cambiar la estructura de la martensita, tiene además, un beneficioso efecto sobre la austenita retenida. El revenido alivia también las tensiones residuales producidas por el enfriamiento brusco en el revenido.

El revenido hace que la martensita vuelva a fases más estables al ser la pieza de nuevo calentada. La resistencia al revenido depende principalmente de la composición química del acero. Cuanto mayor sea la proporción de austenita revenida y de carburos disueltos, mayor será la resistencia al revenido de la pieza.

Como la martensita se modifica a bajas temperaturas de revenido, y esta es dura, frágil y con tensiones, el revenido a bajas temperaturas mejorara todas estas propiedades en detrimento de la dureza.

El resultado del revenido, se traduce en un cambio estructural del acero y alivio de las tensiones residuales procedentes del temple, con la mejora de tenacidad en la pieza. Por lo tanto con el revenido se consigue establecer una relación entre dureza, resistencia al desgaste y tenacidad.

Modificaciones de medidas de temple y revenido

Se trata de modificar las alteraciones o percances inevitables que se producen, como variaciones dimensionales que sufre el acero durante el temple y revenido. Dichas modificaciones consisten en la variación de los siguientes parámetros:

- La velocidad de calentamiento y velocidad de enfriamiento.
- Composición química del acero, templabilidad, tamaño del grano austenítico.
- Geometría de la pieza, molde o herramienta.

Con una temperatura de revenido creciente se produce una contracción del material revenido por la transformación de la austenita revenida en martensita. En el revenido, la temperatura dependerá de la composición del acero, cuanto más estable sea la austenita retenida, mayor será la temperatura de revenido para su transformación en martensita.

La estabilidad de las variaciones en las dimensiones de una pieza templada y revenida, es de gran importancia si se quiere tener una gran precisión dimensional, ya que si las dimensiones de la pieza, molde o herramienta, varían, habrá que tener entonces en cuenta las dificultades técnicas y económicas que implica hacer un rectificado final.

Tratamientos superficiales

Para mejorar notablemente la vida útil de moldes, herramientas y matrices, se hace uso de los tratamientos superficiales. Este tratamiento se debe de ajustar a las solicitudes que va a soportar la pieza a tratar a lo largo de su ciclo de trabajo. Los tratamientos superficiales son el último tratamiento térmico que se le hace a la pieza, después de temple, revenido y mecanizado o rectificado de la pieza.

Las ventajas que tienen estos tratamientos son que aportan una mayor resistencia al desgaste, mayor resistencia a la erosión y mayor resistencia a la corrosión. Además, minimiza el coeficiente de fricción entre material inyectado y molde, por lo que se produce una menor adhesión del material. Los tratamientos superficiales más utilizados son:

- Nitruración.
- Boruración.
- Cromado.
- Recubrimientos por deposición de capas finas y muy duras de carburos.

De los anteriormente nombrados, la nitruración es el más utilizado, ya que es fácil de realizar, económico y de fácil aplicación. En ella se aplican temperaturas entre los 500 y 580°C. Sin embargo, los tratamientos térmicos por deposición de capas finas y muy duras han experimentado un aumento muy grande en su utilización, debido a que se ha demostrado que es un excelente tratamiento antidesgaste.

CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS EXPERIMENTALES

1. Ultradur
2. Placas del molde de inyección
3. Máquina inyectora
4. Microscopio electrónico de barrido
5. Metalizado por plasma
6. Perfilómetro óptico
7. Otra instrumentación
8. Procedimiento experimental

1. Ultradur

Ultradur es el nombre comercial que BASF usa para su línea de poliésteres saturados con parte cristalina. Esta línea se basa en el tereftalato de polibutileno y se emplea en aplicaciones que exigen un alto nivel de rendimiento tales como piezas de carga en diferentes sectores industriales.

Ultradur destaca por su alta rigidez, resistencia, estabilidad dimensional, baja absorción de agua y alta resistencia a muchos productos químicos. Por otra parte, exhibe excepcionales resistencias a la intemperie y un excelente comportamiento al envejecimiento.

1.1. Ultradur en la industria

Las aplicaciones más importantes de Ultradur se dan en la ingeniería de la automoción, ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones, así como en la ingeniería de precisión e ingeniería mecánica en general.

Ultradur demuestra la alta calidad en cuanto a eficacia, sobre todo lo pone de manifiesto en la industria del automóvil. Siendo rígido, resistente al impacto, dimensionalmente estable, resistente al calor, resistente a la intemperie y resistente a los combustibles y lubricantes. Estas propiedades han hecho de Ultradur un material imprescindible en muchas aplicaciones en ingeniería automotriz moderna.



Figura 38. Ultradur en un reposacabezas de automóvil

Ultradur se utiliza por ejemplo para las cubiertas y las partes funcionales en eléctrica, en los brazos de limpia parabrisas, tiradores de las puertas, las estructuras de los faros, los sistemas de espejos, componentes de techo solar y en muchas otras aplicaciones.

En la ingeniería eléctrica y en la electrónica. Cada vez son más complejos los componentes en lo que a eléctrica se refiere, aunque esto no supone un problema para Ultradur siendo resistente al calor y presentando un alto rendimiento a la circulación eléctrica y térmica a largo plazo. Además, es versátil en sus aplicaciones, en cuanto a una mayor fluidez a la hidrólisis presentando una fuerte resistencia, baja deformación, excelente láser de soldadura, así como muy buenas características ignífugas.

Además Ultradur se utiliza en conectores y en tiras de conector, siendo además líder de fabricación en bobinas, en piezas de la lámpara, llantas de ventilador PC y cables de fibra óptica. Además es ampliamente utilizado en la electrónica del automóvil para controles electrónicos, sensores, actuadores y sistemas de conector.

1.2. Las propiedades de Ultradur

El rango de Ultradur incluye una variedad de grados de PBT que difieren en sus propiedades de flujo, desmoldeo y el establecimiento de comportamiento.

El rango reforzado en grados se utilizan para las piezas con una calidad de superficie muy buena, con aplicaciones que van desde la película de envasado, a los conectores de filigrana en aparatos eléctricos de ingeniería y piezas funcionales como las ruedas dentadas. El rango de grados no reforzado se utiliza en aplicaciones de extrusión, como por ejemplo en la fabricación de cables de fibra óptica.

Además, demuestra todo el potencial de sus propiedades positivas en una amplia gama de vidrio reforzado con fibra de grados. Dependiendo de lo que es necesario, la gama de Ultradur incluye una serie de grados de vidrio y conteniendo fibra de vidrio hasta un 50 por ciento.

Estos grados de Ultradur son actores clave en las ensamblajes que soportan alta tensión mecánica e incluso elevadas temperaturas, como en el compartimiento del motor de los vehículos.

Con los grados innovadores de Ultradur de alta velocidad, es posible no sólo llenar moldes complejos, sino también reducir significativamente tiempos de ciclo en comparación con materiales estándar. En Ultradur, los grados de alta velocidad tienen diferentes contenidos de fibra de vidrio y también se encuentran disponibles como PBT/ASA mezclas, el S 4.090 grados.

El aumento en el rendimiento es posible en los grados Ultradur de alta velocidad como resultado de la nanotecnología. Gracias a aditivos especialmente diseñados para las nanoestructuras en las cadenas de la molécula puede deslizarse con mayor facilidad en el estado fundido si se compara con las estructuras estándar y por lo tanto muestran un mejor flujo de propiedades. Estos materiales tienen un menor contenido de rellenos anisotrópico y materiales de refuerzo. En una configuración especial, es posible lograr tasas de procesamiento en menor o igual dirección longitudinal y transversal.

Ultradur B 4300 G2 / G4 / G6 / G10, son grados de moldeo por inyección que contiene 10-50 % de fibras de vidrio, de piezas industriales, rígidas, resistentes y estables dimensionalmente, como ejemplo para los interruptores de programa, para las piezas del termostato, para pequeñas cajas del motor de los vehículos, para marcos de los faros, cámaras, automóviles, brazos limpiaparabrisas, los PBC, consolas en contacto con los motores y las cubiertas.

En cuanto a las propiedades térmicas del plástico parcialmente cristalino, Ultradur tiene un estrecho intervalo de fusión entre 220 y 225 grados centígrados. El componente cristalino hace posible sin estrés a las molduras calentar durante períodos cortos por debajo de la temperatura de fusión sin sufrir deformaciones o degradación.

Tabla 10. Características de la familia Ultradur

Características	B4250	B4300 G2	B4300 G4	B4300 G6	B4300 G10
Contenido de vidrio peso (%)	0	10	20	30	50
Impacto de fallo de energía (KJ/m ²)	140	12	5	1.6	0.8
Fuerza de impacto +23 °C (KJ/m ²)	290	38	58	72	65

Ultradur se caracteriza por un bajo coeficiente de expansión lineal presentando una alta estabilidad dimensional cuando los cambios de temperatura se producen. En el caso de la fibra de vidrio la expansión lineal es determinada por la orientación de las fibras. A causa del refuerzo de fibra de vidrio la estabilidad dimensional de la exposición al calor aumenta significativamente en comparación con no reforzada en fibra de vidrio.

1.3. Ultradur B4300 G10

El polímero elegido para ser inyectado en el molde ha sido Ultradur B4300 G10, ya que es un plástico reforzado en un 50% en fibra de vidrio, lo cual ayuda a no tener un número elevado de inyectadas, obteniendo un desgaste significativo en el molde con el fin de poder llevar a cabo el estudio. Éste material tiene la designación (PBT+PET)-GF50 según ISO.

1.3.1. Descripción del producto

- Designación abreviada de acuerdo con la norma ISO 1043-1: PBT.
- Clasificación Según ISO 7792-1.
- Compuesto que moldea de la norma ISO 7792-PBT, MGHLNR, 09-160, GF50.
- Inyección de grado con fibras de vidrio del 50% para piezas técnicas rígidas de moldeo, por ejemplo los PCB y las cajas pequeñas de motor

1.3.2. Forma física y almacenamiento

El embalaje estándar incluye los 25 kg, bolsa de 1.000 Kg. y octabin (recipiente octogonal). Todos los contenedores están bien cerrados y deben abrirse sólo inmediatamente antes del procesamiento. La densidad aparente es de aproximadamente 0,7 a 0,8 g/cm³.



Figura 39. Bolsa 25 kg. Ultradur B4300 G10

En condiciones normales Ultradur se puede almacenar por períodos ilimitados. Incluso en las temperaturas elevadas, por ejemplo, 40 °C en el aire, y bajo la acción de la luz solar y del clima no se producen reacciones de descomposición.

Ultradur debería tener un contenido de humedad de menos del 0,04% cuando se está procesando, a fin de garantizar una producción fiable, por este motivo se produce el pre-secado 48 horas antes de cargar la máquina de inyectado.

1.3.3. Seguridad de los productos

Estos polímeros son estables a temperaturas de hasta 280 °C y no dan lugar a riesgos, debido a la degradación molecular o la evolución de los gases y vapores como ocurre en todos los polímeros termoplásticos, sin embargo, Ultradur se descompone por exposición a las excesivas tensiones térmicas, por ejemplo, cuando se sobrecalienta.

La descomposición se acelera por encima de 350°C a pequeñas cantidades de aldehídos y de saturados, en los hidrocarburos no saturados también se forman cuando Ultradur es procesado correctamente y no hay aspiración adecuada en él, no dando ningún riesgo para la salud.

1.4. Tablas Ultradur B4300 G10

En este apartado se muestran las tablas de propiedades de Ultradur B4300 G10.

La tabla 11 muestra las principales propiedades y características del Ultradur B4300 G10 así como los valores de procesamiento útiles para la puesta a punto de la máquina de inyección.

Tabla 11. Principales propiedades de Ultradur B4300 G10

Propiedades	Valor
Abreviatura polímero	PBT-GF50
Densidad (kg/m³)	1730
Índice de fluidez volumétrico (cm³/10min)	3
Secado	
Humedad máxima (%)	0,04
Temperatura de secado (°C)	80-120
Tiempo de secado (h)	4
Moldeo por inyección	
Rango temperaturas fundición (°C)	260-275
Temperatura de fundición óptima (°C)	270
Rango de temperaturas molde (°C)	80-120
Temperatura óptima molde (°C)	80
Configuración de la máquina	
Temperatura de la tolva (°C)	80
Temperatura zona alimentación (°C)	260
Temperatura zona de compresión (°C)	265
Temperatura parte delantera del tornillo (°C)	270
Temperatura de la boquilla (°C)	270
Velocidad periférica del tornillo (m/s)	≤0,25
Contracción	
Contracción de moldeo longitudinal (%)	0,2
Contracción de moldeo transversal (%)	0,9

En la tabla 12 muestra los valores de sus propiedades mecánicas y los métodos de ensayo por los cuales se han obtenido.

Tabla 12. Propiedades mecánicas de Ultradur B4300 G10

Propiedades Mecánicas	Valor	Método de ensayo
Módulo de tracción (MPa)	18700	ISO 527-1/-2
Resistencia a la tracción (MPa)	165	ISO 527-1/-2
Alargamiento a rotura (%)	1.5	ISO 527-1/-2
Resistencia al impacto Charpy (+23°C) (kJ/m²)	52	ISO 179/1eU
Resistencia al impacto Charpy (-30°C) (kJ/m²)	58	ISO 179/1eU
Res. impacto Charpy c/entalla (+23°C) (kJ/m²)	10	ISO 179/1eA

1.5. Gráficas Ultradur B4300 G10

En este punto se muestran gráficas representativas de las propiedades del Ultradur B4300 G10.

En la primera gráfica podemos apreciar como Ultradur B4300 G10 a temperaturas altas se comporta como un fluido no newtoniano. Conforme aumentamos la presión disminuye la densidad, pudiéndolo introducir por orificios muy pequeños durante la inyección de probetas.

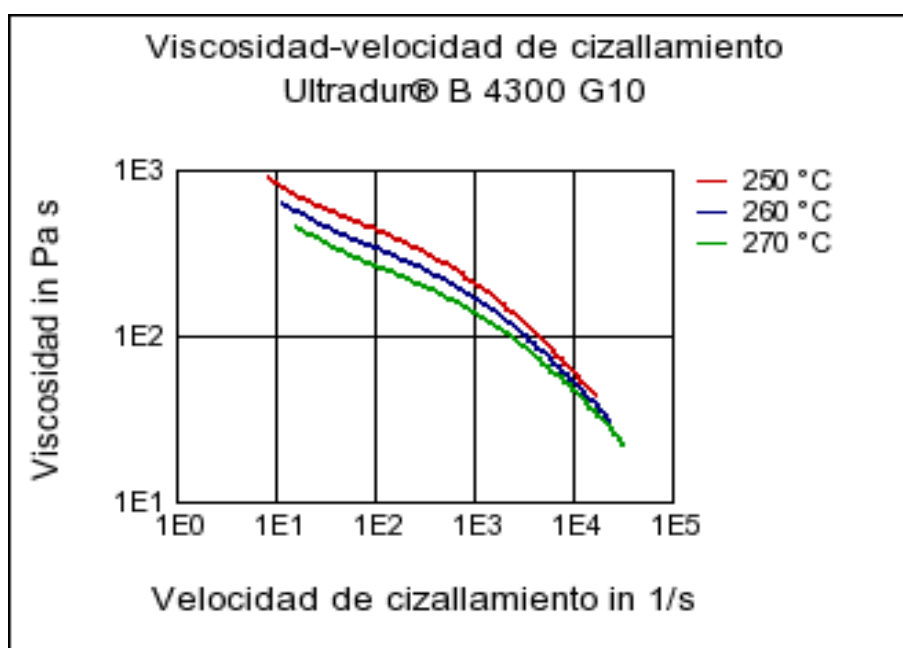


Figura 40. Gráfica de velocidad de cizallamiento frente viscosidad

En la gráfica de la figura 41, apreciamos que hay una temperatura de transición (T_g) en la cual el material sufre una disminución de su resistencia debido a que necesita un tiempo para reestructurar las cadenas moleculares en su interior.

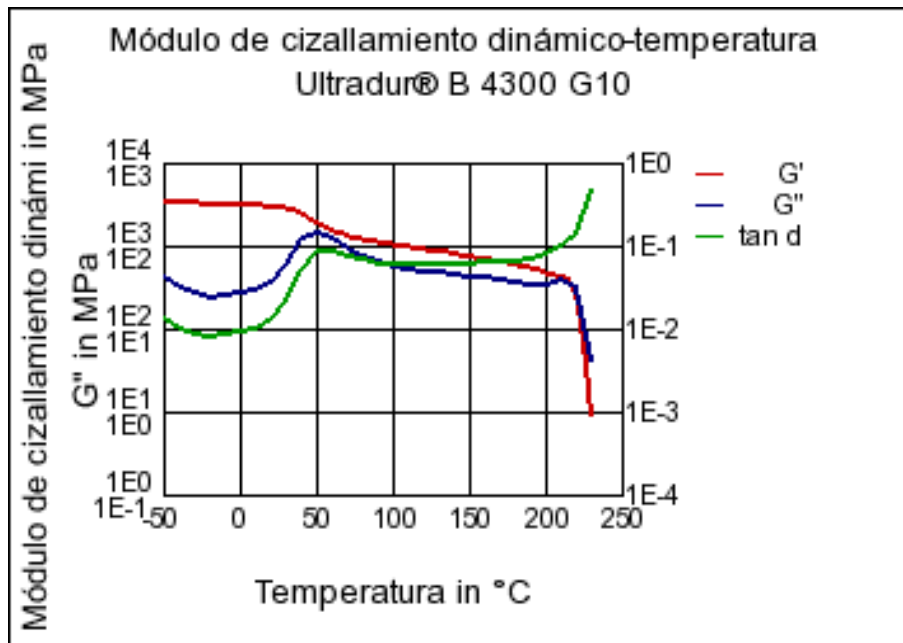


Figura 41. Gráfica de temperatura frente Módulo de Young

En esta gráfica de esfuerzo-alargamiento, podemos ver que cuanto mayor sea la temperatura menor será el esfuerzo que podemos aplicar aumentando el alargamiento.

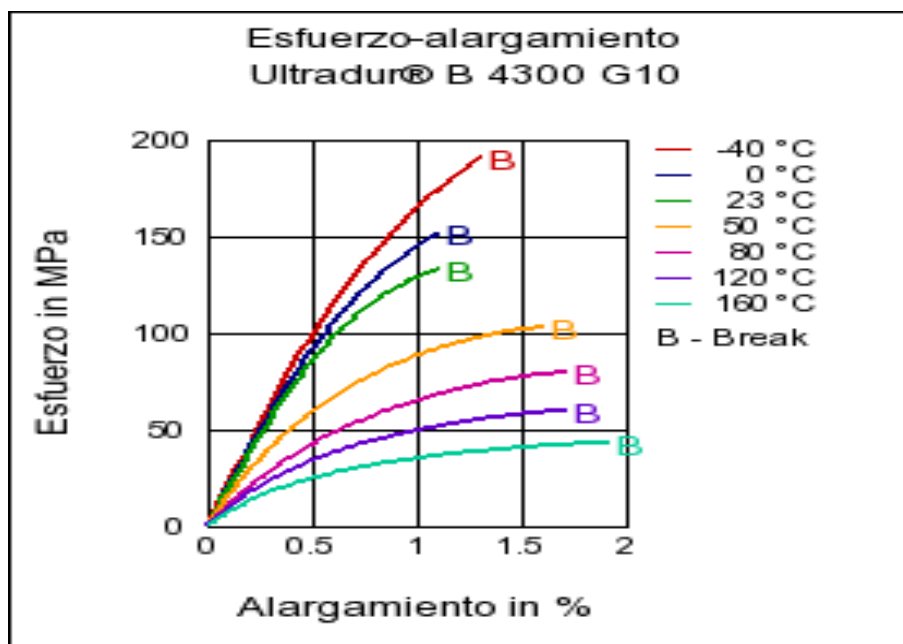


Figura 42. Gráfica de esfuerzo frente el alargamiento

La última gráfica ilustra un ejemplo de cómo el índice de viscosidad varía en función de la temperatura de fusión y del tiempo de residencia.

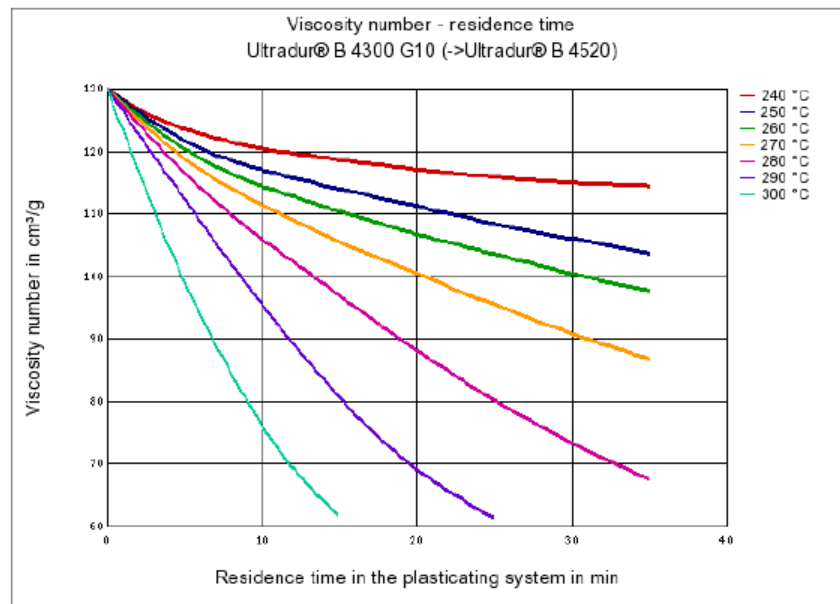


Figura 43. Gráfica de índice de viscosidad frente a tiempo de residencia

Temperaturas innecesariamente altas y tiempos de fusión demasiado largos de la masa fundida en el cilindro pueden provocar degradación molecular. Una degradación del material menor del 10% es tolerable. En el caso de que se supere este valor los parámetros de procesamiento y secado se deben ser comprobados.

2. Placas del molde de inyección

En el molde de la máquina inyectora se encuentran las dos placas de acero (A y B) que darán forma a las muestras y que nos servirán de estudio para comprobar el daño superficial y desgaste producidos por la incidencia de las fibras durante el proceso de inyección.

2.1. Material

El material del que están compuestas las placas es **acero 1.2343** (X38CrMoV5-1; SAE H11). Este acero para trabajar en caliente normalizado (23 HRC) es el W300 de Böhler, denominado como acero para herramientas aleado al Cromo, Molibdeno, Vanadio y Silicio.

El W300 de Böhler se trata de un acero para trabajar en caliente de gran resistencia y resistencia al desgaste en estado caliente. Posee una buena tenacidad y resistencia a fisuras por recalentamiento, además se presta para el enfriamiento en agua.

La composición química y las denominaciones según las diferentes normas de este acero son las siguientes:

Tabla 13. Composición química (valores aproximados en %) del acero 1.2343

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0,38	1,10	0,40	5,00	1,30	0,40

Tabla 14. Normas del acero 1.2343

EN/DIN	<1.2343> X38CrMoV5-1
AISI	H11
UNS	T20811
BS	BH11
UNE	F5317 X37CrMoV5
GOST	4Ch5MFS
JIS	SKD6
UNI	X37CrMoV5-1 KU
AFNOR	Z38CDV5

Aplicación

Las posibles aplicaciones de este acero son entre otras, para herramientas de trabajo en caliente sometidas a esfuerzos elevados, tales como punzones y matrices para prensar, cilindros, receptores para la extrusión de barras y tubos metálicos, herramientas de extrusión por impacto en caliente para la fabricación de cuerpos huecos, herramientas para la fabricación de tuercas, tornillos, remaches y bulones.

También es utilizado para herramientas para fundición a presión, para prensar piezas perfiladas, elementos de matrices, cuchillas para cortar en caliente.

Su gran tenacidad al impacto es especialmente valorada en utillajes sujetos a altas tensiones mecánicas y térmicas, por ejemplo en moldes de fundición inyectada o matrices para forja. En términos prácticos, los utillajes pueden ser utilizados a una dureza de trabajo algo más elevada sin tener pérdida de tenacidad. Puesto que se incrementa la dureza de servicio, la formación de grietas por fatiga térmica se ve limitada y por tanto cabe esperar una mejora en la vida de servicio del utillaje.

Propiedades físicas y mecánicas

Entre las propiedades principales de este acero destacan un alto nivel de resistencia contra el choque térmico y la fatiga térmica, una buena resistencia a altas temperaturas, una excelente tenacidad y ductilidad en todas direcciones.

La siguiente tabla recoge las principales propiedades físicas y mecánicas del acero 1.2343 (X38CrMoV5-1; SAE H11).

Tabla 15. Propiedades físicas y mecánicas del acero 1.2343

	Valor
Densidad (kg/dm³)	
a 20°C	7,80
a 500°C	7,64
a 600°C	7,60
Calor específico (J/(Kg·K))	
a 20°C	460
a 500°C	550
a 600°C	590
Resistencia eléctrica específica (Ω·mm²/m)	
a 20°C	0,52
a 500°C	0,86
a 600°C	0,96
Módulo de elasticidad (N/mm²)	
a 20°C	215·10 ³
a 500°C	176·10 ³
a 600°C	165·10 ³

Conformación en caliente

Forjado:

- 1100 - 900°C
- Enfriamiento lento en horno o en material termoaislante

Tratamiento térmico

- Recocido blando: 750 - 800°C
Enfriamiento lento y controlado en el horno 10-20°C/h, hasta 600°C aprox., enfriamiento posterior al aire.
Dureza después del recocido blando: máx. 205 HB
- Recocido de distensión: 600 - 650°C
Enfriamiento lento en el horno.
Para disminuir la tensión después de un mecanizado extenso, o en herramientas complicadas. Tiempo de permanencia después del calentamiento a fondo: 1 – 2 horas en atmósfera neutra

- Temple: 1020 - 1080°C
Aceite, baño de sales (500-550°C) y aire.
Tiempo de permanencia después del calentamiento a fondo: 15 - 30 minutos.
Dureza obtenible: 52 - 56 HRC con temple en aceite o baño de sales, 50 - 54 HRC con temple al aire
- Revenido
Calentamiento lento a temperatura de revenido inmediatamente después del temple.
Tiempo de permanencia en el horno: 1 hora por cada 20 mm de espesor de la pieza, pero 2 horas como mínimo.
Enfriamiento al aire. Se recomiendan dos ciclos de revenido como mínimo.
Resulta favorable un 3er revenido para reducir tensiones.
 - 1º revenir aproximadamente 30°C por arriba de la dureza máxima de revenido
 - 2º revenir a dureza útil
 - 3º revenir para distensionar unos 30-50°C por debajo de la temperatura máxima de revenido

El diagrama de revenido muestra los valores medios de dureza de revenido.

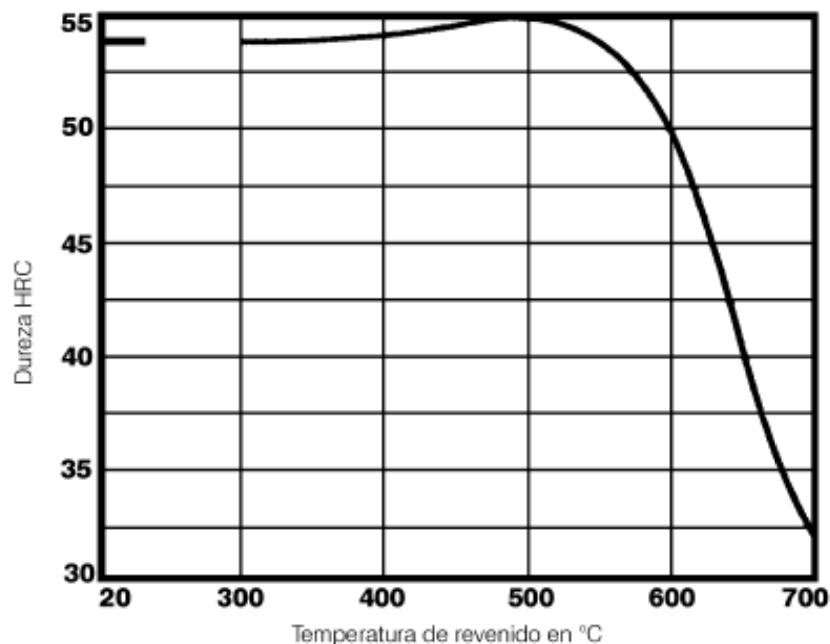


Figura 44. Diagrama de revenido

Tratamiento superficial

Nitruración. Las herramientas de esta calidad se prestan tanto para la nitruración con gas, como para la nitruración en baño.

A continuación se muestra un esquema del tratamiento térmico completo.

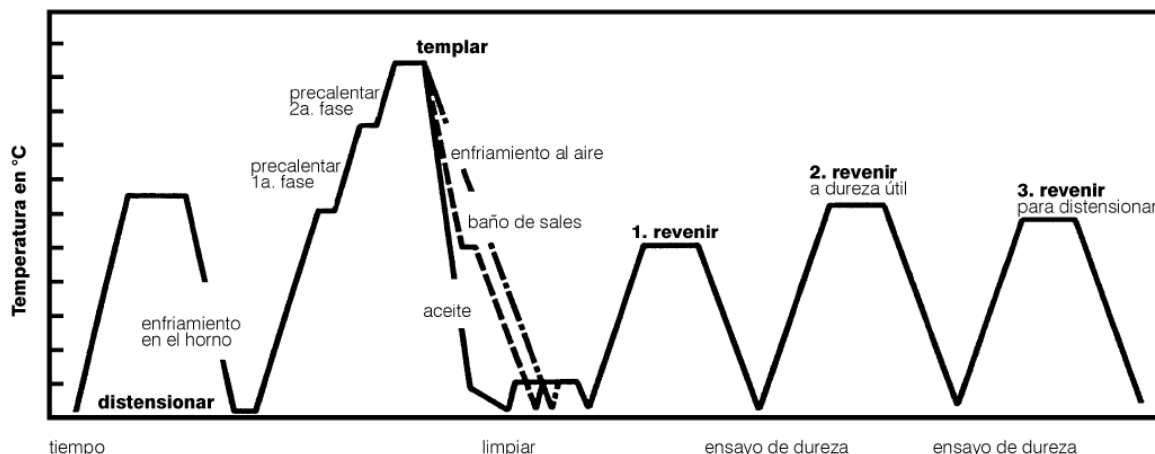


Figura 45. Esquema de tratamiento térmico

El estado en que se trabajó el acero en el proceso de inyección corresponde al estado normalizado, sin tratamiento térmico de temple y revenido.

2.2. Dimensiones

Las dimensiones y geometría de las placas de acero y su disposición en el molde de la máquina inyectora son datos de gran importancia a la hora de realizar el estudio de desgaste tanto de las placas del molde como de las muestras de inyección.

En la imagen de la figura 46 se muestra una de las dos placas de idénticas dimensiones usadas, después de haber sido sometida al proceso de inyección.



Figura 46. Placa de acero del molde de inyección A

Las placas presentan un ángulo de inclinación para que la pieza solidificada pueda ser expulsada con una mayor facilidad del molde. Este ángulo es de $2,5^\circ$ y puede apreciarse más fácilmente en la siguiente representación acotada de las vistas de la placa (figura 47).

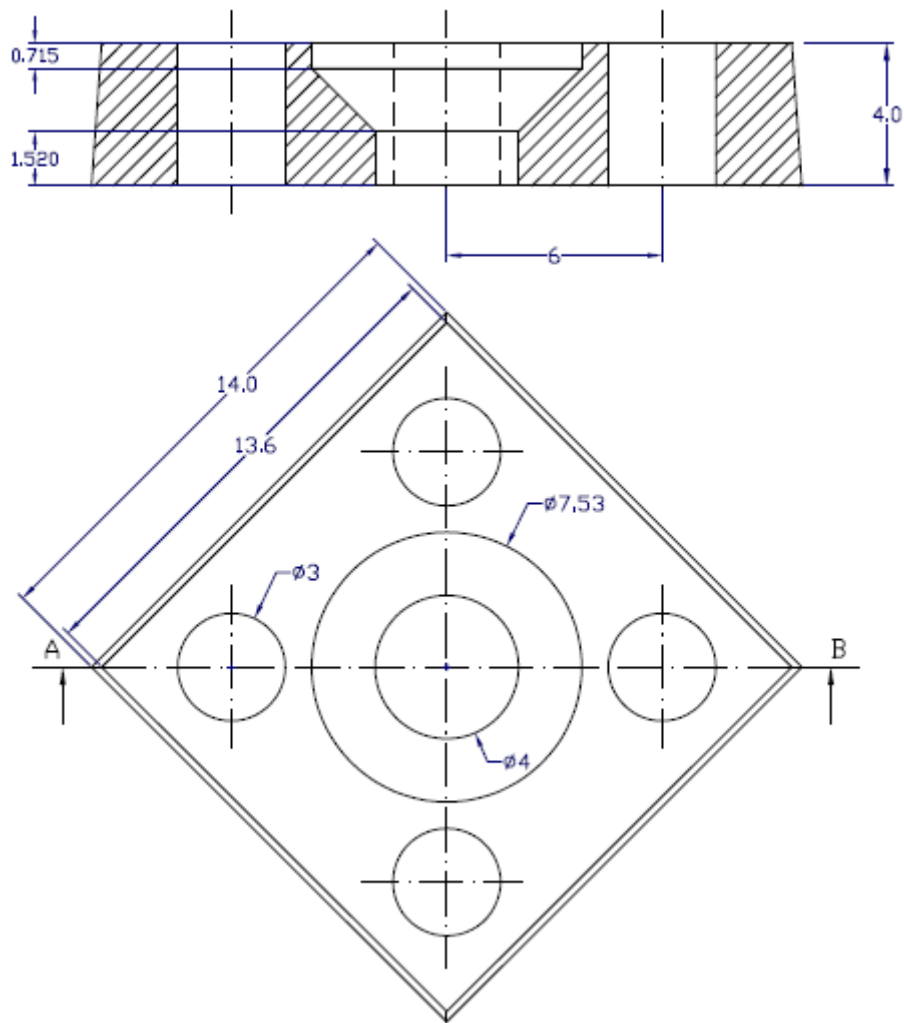


Figura 47. Esquema acotado de la placa del molde de inyección

2.3. Sujeción al molde

Las dos placas están sujetas de idéntica forma al molde de la máquina de inyección por medio de un tornillo avellanado Allen M4x12 y cuatro pasadores Ø3x14.

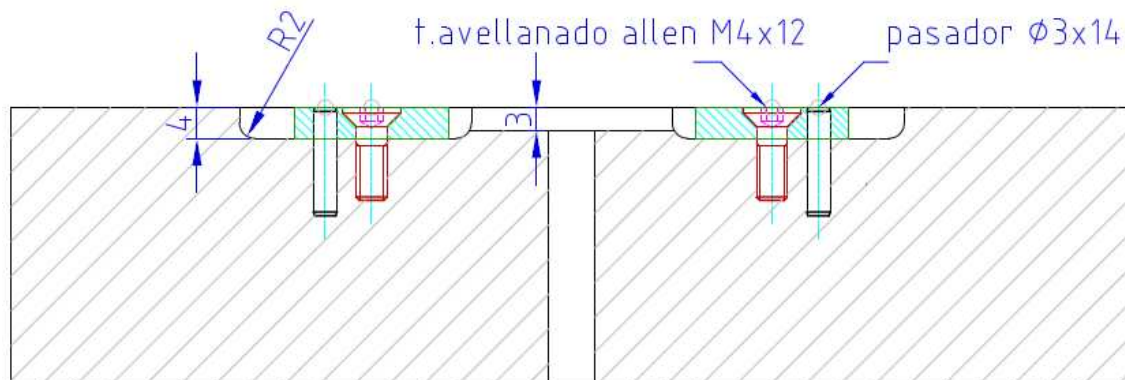


Figura 48. Esquema sujeción de las dos placas al molde de inyección

3. Máquina inyectora

Anteriormente se describió el proceso de inyección y las características generales de las máquinas de inyección. En este apartado nos vamos a centrar en la máquina utilizada para nuestro estudio. Esta máquina, ubicada en el departamento de materiales de la UPCT, utilizada para la obtención de las probetas es del modelo **250H55 mini VP** de Industrias DEU. Algunas de sus características generales son las mostradas en la tabla 16.

Tabla 16. Características generales de la inyectora

Características	Valor
Peso de la máquina sin aceite (kg)	1.500
Medidas de la máquina (mm)	
L	2.800
H	1.100
F	1.750
Volumen depósito aceite hidráulico (lts)	100



Figura 49. Máquina de inyección DEU 250 H55 mini VP

A continuación se enumeran las partes y características más importantes de esta máquina de inyección.

3.1. Unidad de cierre

- Plato fijo bien nervado, robusto y sobredimensionado.
- Plato móvil bien nervado con puente de refuerzo en la zona de expulsión, robusto y sobredimensionado con cojinetes de bronce / grafito sobre las columnas.
- Ajuste automático de molde por sensor fotoeléctrico.
- Dos transductores lineales de precisión, para el control de posición de apertura del plato móvil y de la expulsión.
- Lubricación automática de la Rodillera, programada en pantalla.
- Lubricación del Grupo de Inyección mediante bomba manual centralizada.
- Lubricación de los cojinetes del plato móvil por bomba manual (no centralizada).
- Control alarma por depósito de engrase vacío.
- Expulsor hidráulico regulado en presión, velocidad y posición.
- Plato móvil con cuatro escalonamientos de regulación en presión y velocidad en función de la posición.
- Válvula de aire.
- Cierre en alta velocidad.
- Preparado para el sistema rápido de desbloqueo del expulsor/molde.
- Soporte del sistema de expulsión integrado en la fundición del plato móvil.

Tabla 17. Características del grupo de cierre de la inyectora

Características	Valor
Fuerza de cierre (kN)	250
Máxima apertura entre platos (mm)	470
Máxima apertura del molde (mm)	220
Espesor de molde mínimo-máximo (mm)	100 – 250
Espacio horizontal entre barras (mm)	270
Diámetro de las barras (mm)	45
Medida de los platos (HxV) (mm)	410x410
Número de puntos de expulsión (n)	1
Fuerza del expulsor (kN)	13
Carrera del expulsor (mm)	60
Potencia de la bomba hidráulica (kW)	7,5
Presión máxima de la bomba (bar)	160

3.2. Unidad de inyección

- De cuatro diámetros distintos de husillo.
- Giro del conjunto de inyección para facilitar el cambio de cámara y/o husillo.
- Motor hidráulico de alto par en acoplamiento directo sobre husillo, sin elementos intermedios.
- Contrapresión de carga.
- Un transductor lineal de precisión, para el control de posición de inyección y carga.
- Un transductor lineal para acercamiento del carro de inyección.
- Sensor para control de la presión de inyección.
- Inyección mediante dos pistones balanceados a ambos lados del husillo de inyección.
- Dos cilindros hidráulicos en posición simétrica al husillo para los movimientos del grupo de inyección.

Tabla 18. Características de la unidad de inyección

Características	Valor
Husillo tipo	A "Std"
Diámetro nominal del husillo (mm)	20
Presión de inyección (bar)	2.100
Volumen teórico de inyección (cm ³)	25
Peso teórico de inyección (g)	22
Velocidad de inyección (cm ³ /s)	53
Capacidad de plastificación (g/s)	4,44
Relación longitud/diámetro del husillo (L/D)	20
Número de vueltas del husillo (rpm)	335
Número de resistencias (n)	1+3
Potencia total en calefacción (kW)	3,2

3.3. Unidad hidráulica

- Circuito hidráulico inteligente, con importante ahorro energético.
- Circuito adicional para el seguro de molde.
- Regulación automática de la temperatura del aceite.
- Sensor de nivel mínimo de aceite.

- Filtro externo y continuo del aceite, mediante by pass.
- Válvulas, bombas, conexiones, etc. homologadas según normas europeas.
- Sistema de precalentamiento del aceite.
- Bomba de caudal variable.

3.4. Unidad eléctrica y de seguridad

- Circuito de seguridad, según normas CE, basado en una doble señal, con circuito de emergencia independiente.
- Control electrónico de placas modulares.
- Panel de control con teclado sensitivo totalmente protegido del ambiente.
- Re-asignación fácil de entradas o salidas del control por software.
- Relés de estado sólido para control de la temperatura de calefacción.
- Resistencias eléctricas con conectores.

3.5. Unidad de control C4000v2.3

- Pantalla en color para la supervisión del proceso, con datos de cierre, inyección, temperaturas, tanto en presión, velocidad y tiempo.
- Pantalla con parámetros de cierre, dos velocidades de avance, seguro de molde y alta presión.
- Pantalla con parámetros de inyección, con 6 etapas de llenado controladas por posición, presión y velocidad. Mantenimiento de presión con 4 etapas controladas por presión, velocidad y tiempo.
- Pantalla con parámetros de carga y succión. En carga control de la contrapresión, velocidad y posición del husillo. En succión control de la presión, velocidad y recorrido del husillo, por posición o por tiempo.
- Control de auto purga por número de procesos y su duración.
- Pantalla con gráfico del perfil de presiones reales de inyección y de mantenimiento.
- Pantalla con parámetros de expulsión, con control de presión, velocidad y posición.
- Modo expulsión en semiautomático y automático, control del número de golpes (hasta 99) o en vibración, con distinta regulación para la primera y las siguientes expulsiones.
- Nuevo intento de expulsión si la pieza no es detectada por las fotocélulas (opcionales) o es atrapada al cerrar (seguro de molde).

- Control de expulsión por aire por posición, tiempo de actuación y retraso de activación.
- Pantallas de parámetros de noyos.
- Control de parámetros de ajuste de molde por presión y velocidad.
- Contador de piezas y contador de paquetes.
- Control de temperatura mediante la selección del valor deseado, indicación de la temperatura real y del estado de cada zona de calentamiento.
- Programación de las horas de arranque automático de la calefacción en ciclos semanales.
- Monitorización de los parámetros de cierre, seguro, presión, apertura, expulsión, ciclo, apertura, ciclo inyección, contrapresión, colchón e inicio de inyección. Valores de referencia con tolerancia máxima y mínima que producirán alarma en caso de que algún valor salga del rango establecido.
- Pantalla de monitorización y almacenamiento de los principales valores del ciclo de producción.
- Pantalla de mensajes de alarmas con indicación de la alarma producida, hora de activación y hora de solución de la alarma.
- Puesta a cero de los transductores.
- Base de datos de moldes.
- Memoria para guardar 200 moldes.



Figura 50. Panel de control máquina de inyección

4. Microscopio electrónico de barrido

El microscopio electrónico de barrido (SEM) es un instrumento capaz de ofrecer un variado rango de informaciones procedentes de la superficie de la muestra.

Este microscopio hace incidir un delgado haz de electrones acelerados sobre una muestra gruesa, opaca a los electrones. Este haz se focaliza sobre la superficie de la muestra de forma que realiza un barrido de la misma siguiendo una trayectoria de líneas paralelas. Mientras en un monitor se visualiza la información que hayamos seleccionado en función de los detectores que haya disponibles.

De todas las formas de radiación resultantes de la interacción del haz incidente y la muestra hay dos realmente fundamentales en el microscopio de barrido: los **electrones secundarios** y los **electrones retrodispersados**. Los primeros son electrones de baja energía (decenas de eV) que resultan de la emisión por parte de los átomos constituyentes de la muestra (los más cercanos a la superficie) debido a la colisión con el haz incidente.

Los electrones retrodispersados sin embargo, son electrones del haz incidente que han interactuado (colisionado) con los átomos de la muestra y han sido reflejados. La intensidad de ambas emisiones varía en función del ángulo que forma el haz incidente con la superficie del material, es decir depende de la topografía de la muestra.

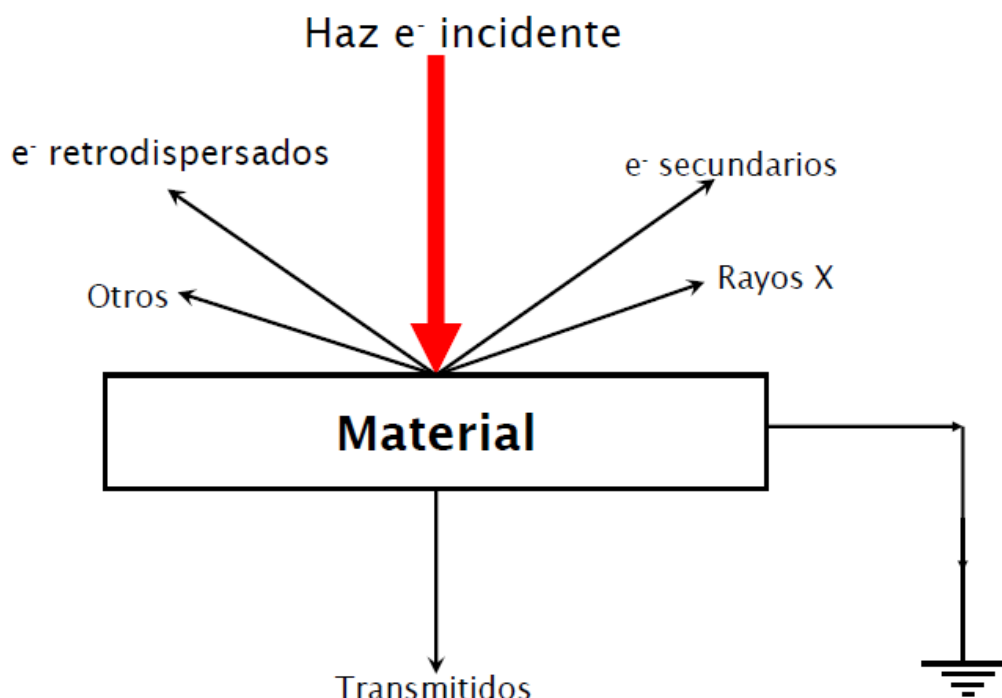


Figura 51. Interacción electrón - material

La señal emitida por los electrones y radiación resultantes del impacto se recoge mediante un detector y se amplifica para cada posición de la sonda. Las variaciones en la intensidad de la señal que se producen conforme la sonda barre la superficie de la muestra, se utilizan para variar la intensidad de la señal en un tubo de rayos catódicos que se desplaza en sincronía con la sonda. De esta forma existe una relación directa entre la posición del haz de electrones y la fluorescencia producida en el tubo de rayos catódicos. El resultado es una imagen topográfica muy ampliada de la muestra.

El aumento de la imagen producido por el microscopio de barrido resulta de la relación entre las dimensiones de la imagen final y el área de la muestra que ha sido barrida.

Modo de operación

Es posible diferenciar entre la señal producida por los electrones secundarios y la generada por los electrones retrodispersados.

La intensidad de emisión de los electrones retrodispersados depende del número atómico medio de los átomos de la muestra, así los átomos más pesados producen mayor cantidad de electrones retrodispersados. Una imagen originada por los electrones retrodispersados revela diferencias en la composición química por diferencias de contraste.

Los electrones incidentes excitan los átomos de la muestra y provocan la emisión de rayos X cuya longitud de onda es característica de los elementos presentes en la muestra y cuya intensidad para una determinada longitud de onda es proporcional a la concentración relativa del elemento a esa longitud de onda.

Características

El modelo del microscopio electrónico de barrido es el **HITACHI S-3500N**, el cual se ha utilizado para observar la orientación de las fibras contenidas dentro del Ultradur así como su el desgaste en probetas y placas.

Sus principales características son las siguientes:

- Cañón de electrones con un voltaje acelerador de 0,5 a 30 kV, ajustable por pasos
- Fuente de electrones con filamento de W, polarización automática y alineamiento electrónico del cañón
- Sistema de lentes con supresión de histéresis. Corriente de sonda con ajuste manual o automático, ajustable de 1 pA a 1 mA. Corrección de astigmatismo manual y electrónica
- Movimientos motorizados en los ejes X e Y

- Resolución de imagen de electrones secundarios de al menos 3,0 nm, en modo de alto vacío
- Resolución de imagen de electrones retrodispersados de al menos 5,0 nm, en modo de presión variable. Este detector trabaja en modo composicional o topográfico
- Rango de magnificación desde 18x hasta 300.000x, en más de 60 etapas
- Cámara infrarroja
- Sistema de vacío con control de evacuación, provisto de una bomba difusora y dos bombas rotatorias
- Enfoque manual y automático con ajuste grueso y fino. Rastreo automático del foco



Figura 52. Microscopio electrónico de barrido

5. Metalizado por plasma

Al ser observada en el microscopio electrónico de barrido, si la muestra no es buena conductora se acostumbra a recubrirla con una película conductora metálica o de carbono para evitar que ésta se cargue cuando sea irradiada y que refleje bien el haz de luz y se obtengan resultados válidos.

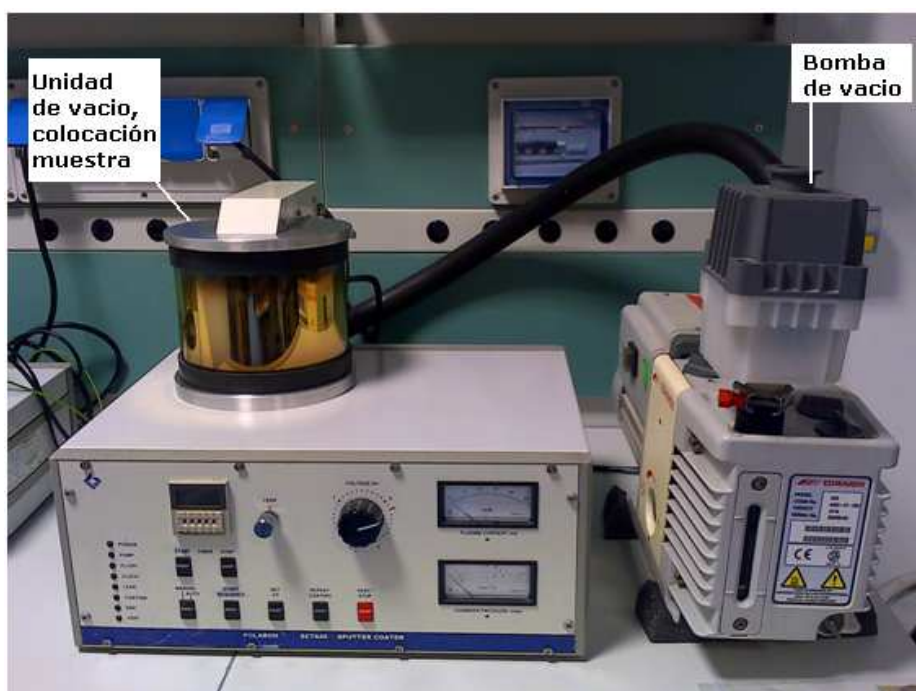


Figura 53. Metalizador de plasma

La metalización de las réplicas metalográficas mediante un recubrimiento de oro en su superficie por plasma se realiza en sistema de metalización en el SAIT. Este metalizador es el modelo **SC7610** de **Quorum Technologies**.

El funcionamiento del metalizador consiste en una cavidad en la cual se hace el vacío colocándose previamente la pieza a metalizar. Esta no puede ser de grandes dimensiones ya que la cavidad del metalizador es reducida. Una vez hecho el vacío dentro, comienza a producirse el fenómeno de plasma, que es un proceso por el cual electrones chocan contra la parte superior de la cavidad desprendiendo partículas de oro que se depositan en forma de micras en la superficie de la pieza a estudiar.

El sistema de metalización utilizado posee las siguientes características:

- Anillos para metalizar con oro, oro-paladio y platino
- Tamaño de grano inferior a 5 nm
- Incremento de la temperatura inferior a 10 °C
- Uniformidad en el recubrimiento mejor del 10 %

6. Perfilómetro óptico

Para estudiar la rugosidad de probetas y placas se ha utilizado el perfilómetro óptico de no contacto focal con el que obtenemos una reproducción tridimensional de las superficies.

El perfilómetro es del modelo **Talylor Hobson Talysurf CLI 500** y sus características técnicas en cuanto a rango y capacidad de carga son los siguientes:

Tabla 19. Características técnicas del perfilómetro óptico

Características	Valor
Rango de medida	
Eje X	100 mm
Eje Y	100 mm
Eje Z	100 mm
Capacidad de carga	10 kg.

Funciones:

- Medición de micro alturas
- Tamaño y consistencia del granulado
- Áreas y volúmenes
- Zonas de contacto
- Topografía superficial
- Rugosidad 2D estándar

Se trata de un instrumento de medición de la topografía superficial. Esto significa que el indicador mide la altitud de tan sólo un punto en un momento, y la probeta en estudio se mueve en una bandeja móvil con el fin de explorar la zona de medición completa.

Normalmente, el sistema está concebido para la medición sin contacto con una lente óptica focal con un único punto del sensor. También puede ser equipado con un indicador de láser de triangulación. Incluso permite ser equipado con un indicador de diamante inductivo.

A través del software asociado al perfilómetro Talymap, se pueden realizar operaciones sobre la imagen generada por este, como realizar un corte transversal y estudiar una superficie equidistante, medir el área de hueco y de pico en una sección de la huella, seleccionar una zona de la huella y determinar su volumen de hueco y pico.



Figura 54. Perfilómetro de contacto no focal

Para la máxima versatilidad, Talysurf sistemas CLI se puede equipar con hasta cuatro cabezas de medición diferentes para medir cada combinación de tipo de material y superficie. Tres tecnologías de medición están disponibles en diferentes rangos y resoluciones para satisfacer las necesidades necesarias en cada momento:

- Longitud de la aberración cromática Medidor: una oferta de calibre sin contacto características una excelente resolución y la medida 3D de alta precisión.
- Láser Medidor de triangulación: sin contacto calibre con una amplia gama capaz de medición 3D rápida.
- Inductivo Medidor: un indicador de contacto que ofrece alta resolución, así como la compatibilidad con los instrumentos tradicionales de lápiz.

Los parámetros que ofrece el software y sus normas son las siguientes:

ISO 4287: *Especificaciones geométricas de producto (GPS). Textura de superficie: Términos, definiciones y parámetros de textura de superficie.*

La norma ISO 4287 define ciertos parámetros en una longitud básica y otros en la longitud de evaluación. Tras la estimación de los parámetros en una longitud básica se efectúa la media de estos parámetros en el conjunto de las longitudes básicas.

En el software, es posible seleccionar el modo de cálculo en las preferencias. La longitud básica es la longitud a partir de la cual se aprecia el parámetro. Para un perfil de rugosidad o de ondulación, la longitud básica equivale al cut-off. Para un perfil bruto, la longitud básica equivale a la longitud total del perfil, llamada longitud de evaluación. Un parámetro calculado a partir de una longitud básica se llama parámetro estimado (o estimador del parámetro). El resultado visualizado es en realidad la media de todos los estimadores en el número de longitud básica, recomendado en 5 por defecto.

Parámetros de amplitud:

- Rt: Altura total del perfil en la longitud de evaluación.
Se indica el resultado en la unidad de longitud del eje Z. Tiene como desventaja falsearse fácilmente a causa de puntos extremos aberrantes.
- Ra: Media aritmética de las diferencias con la media.
Se indica el resultado en la unidad de longitud del eje Z.

$$Ra = \frac{1}{lb} \sum_0^{lb} |Z(x)|$$

Parámetros estadísticos disponibles:

- Mean: la media (μ) se calcula del siguiente modo:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} = \frac{\text{Suma de los valores de todas las observaciones}}{\text{Número total de observaciones}}$$

- Std dev: la desviación típica (σ) indica la extensión de difusión de los datos alrededor de la mediana. Se calcula como la raíz cuadrada de la varianza:

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N}}$$

- Min: valor mínimo
- Max: valor máximo

ISO 25178: *Especificaciones geométricas de producto (GPS). Textura de superficie: Área. Términos, definiciones y parámetros de textura de superficie.*

La norma ISO 25178 define los parámetros de altura (superficie). Estos son una clase de parámetros de acabado de superficie que cuantifican el eje Z perpendicular a la superficie.

- Sa: Altura media aritmética. Rugosidad media de superficie.

$$Sa = \frac{1}{A} \int_A |Z(x, y)| dx dy$$

- Sq: Altura media cuadrática de la superficie.
Desviación típica de la distribución de altura, o rugosidad de la superficie RMS.
Calcula la desviación típica para las amplitudes de la superficie (RMS).

$$Sq = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A z^2(x, y) dx dy}$$

7. Otra instrumentación

7.1. Horno de secado

Como hemos comentado, es necesario realizar un secado en el polímero antes de ser inyectado para eliminar humedades que pueden provocar problemas. Para este secado se ha utilizado el horno ubicado en el departamento.



Figura 55. Horno de secado

7.2. Cortadora de precisión

Algunas de las muestras obtenidas en la máquina inyectora fueron cortadas para poder observarlas tanto en el perfilómetro óptico como en el microscopio electrónico. Estos cortes de probetas se realizaron en la cortadora de precisión ubicada en el departamento.



Figura 56. Cortadora de precisión

8. Procedimiento experimental

El proceso experimental que se ha seguido es el siguiente:

- Materiales de partida:
 - Ultradur G10 (50% fibra de vidrio)
 - Placas de acero 1.2343 normalizado (23 HRC)
- Determinación de la rugosidad de las placas antes de inyectar
- Inyección: obtención de mil muestras
- Preparación de las probetas: corte y metalizado
- Determinación de la rugosidad en probetas y placas (tras inyectar)
- Imágenes microscopio electrónico:
 - Placas A y B
 - Probetas A, B, C y D (orientación de las fibras)
- Análisis de los resultados y conclusiones

Materiales de partida

El material utilizado para obtener las muestras en la inyección ha sido Polibutilen Tereftalato (PBT) reforzado con un 50% de fibra de vidrio (Ultradur B4300 G10, BASF) a partir de gránulos depositados en sacos de 25 Kg.

En el molde de la máquina inyectora se encuentran las dos placas (A y B) de acero 1.2343 (X38CrMoV5-1; SAE H11) normalizado sin tratamiento térmico de temple ni revenido (23 HRC) que servirán para dar forma a las muestras y de las cuales comprobaremos el daño superficial y desgaste producidos por la incidencia de las fibras.

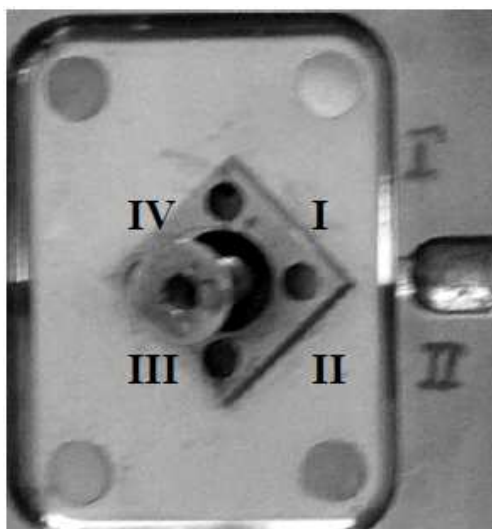


Figura 57. Pared del molde de acero

Antes de realizar el proceso de inyección, los valores de la composición química de las placas del acero W300 de la empresa Böhler fueron confirmados por análisis de espectrometría de chispa obteniendo los siguientes valores (expresados en %):

Tabla 20. Valores comparativos de composición la química del acero

	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
W300 de Böhler	0,38	1,10	0,40	5,00	1,30	0,40
Análisis por chispa	0,374	0,670	0,354	5,390	1,30	0,336

Como se puede apreciar, estos valores obtenidos efectivamente confirman los del acero 1.2343.

Determinación de la rugosidad de las placas antes de inyectar

Antes de realizar el proceso de inyección se determinó la rugosidad y los perfiles tridimensionales de la topografía superficial mediante el perfilómetro óptico Talysurf CLI, según la norma ISO 4287.

Se realizaron cuatro lecturas de rugosidades, dos para cada una de las placas del molde:

- Placa A: Cara I y Cara IV
- Placa B: Cara I y Cara IV

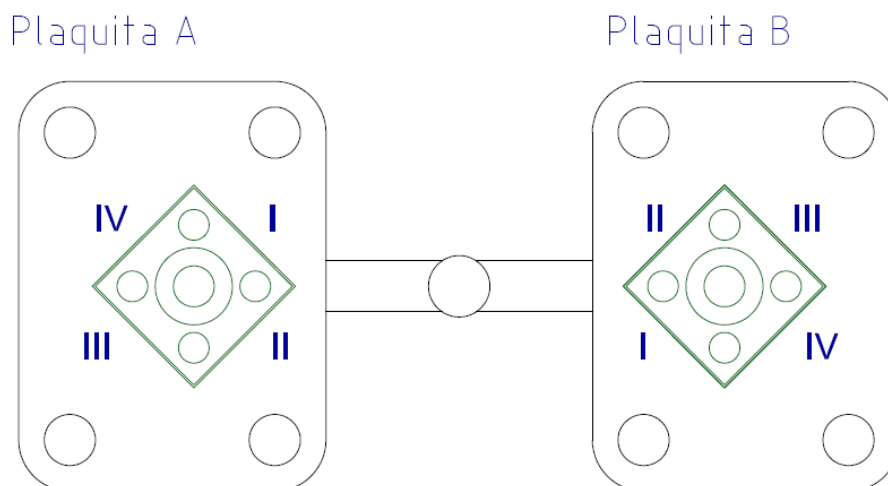


Figura 58. Designación de las caras de las placas A y B

La aplicación informática Tallymap proporciona para cada una de las medidas una plantilla con la siguiente información:

- Imagen de la superficie mediante supresión de forma grado 3
- Rectificación de la imagen anterior

- Malla axonométrica (superficie en 3D)
- Valores de Ra y Rt en las superficies

Inyección: obtención de las mil muestras

Las mil muestras se obtuvieron mediante moldeo por inyección, utilizando la inyectora DEU 250H55 mini VP en el molde de acero anteriormente descrito.

Antes de comenzar con el proceso de inyección y a fin de garantizar una producción fiable se hace necesario un pre-secado del material así como una puesta a punto de la máquina de inyección. El pre-secado de los gránulos de Ultradur B4300 G10 se realizó 24 horas antes de cargar la máquina de inyectado, teniéndolo unas 4 horas a una temperatura de 100°C.

Al comienzo del día en el que se realizó la inyección en serie, se produjo la puesta a punto de los parámetros de la máquina de inyección, solventando los problemas que iban surgiendo, como por ejemplo:

- Llenado insuficiente de la cavidad del molde
- Excesivo calentamiento del polímero en el molde
- Excesivo retroceso del usillo
- Excesivo tiempo de enfriamiento
- Temperatura en el usillo menor de la deseada
- Aumento de la presión de inyección



Figura 59. Muestras obtenidas

Los parámetros utilizados para suplir los problemas se consiguieron realizando una serie de ensayos hasta conseguir las condiciones óptimas, siendo estos los siguientes:

Tabla 21. Características de la máquina inyectora en el proceso de inyección

Características	Valor
Temperaturas en el husillo	
Temperatura 1 (°C)	235
Temperatura 2 (°C)	250
Temperatura 3 (°C)	250
Temperatura 4 (°C)	160
Posición de la puntera del husillo	
Inicio inyección (mm)	200
Fin inyección (mm)	222
Parámetros de expulsión	
Presión (Pa)	50
Velocidades (mm/s)	15 - 95 - 40
Parámetros de inyección	
Velocidad (mm/s)	10
Tiempo de ciclo (s)	22
Temperatura del molde (°C)	50

Una vez realizada la puesta a punto de la máquina, comprobando un buen resultado en las primeras muestras se procede con la inyección en serie. Durante este proceso, se tomó una muestra de cada 50 unidades, para su posible estudio posterior. Para la inyección en serie de las mil unidades se emplearon unas 8 horas.

En la siguiente figura podemos observar un croquis con las dimensiones de las muestras obtenidas de PBT reforzado con un 50% de fibra de vidrio:

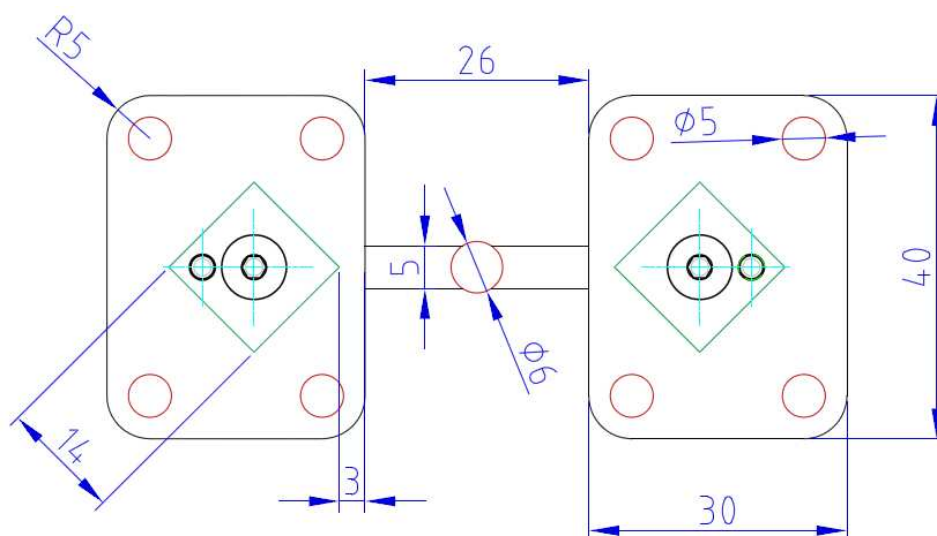


Figura 60. Dimensiones de las muestras de PBT obtenidas en la inyección

Preparación de las probetas: corte y metalizado

Tras realizar las mil operaciones de inyección, la parte A de las muestras primera y última fueron cortadas en la cortadora de precisión del departamento para poder medir la rugosidad en sus cantos I y IV, obteniendo cuatro probetas, dos relativas a la primera inyectada y dos pertenecientes a la operación numero mil.

- Probeta A: Canto I +0
- Probeta B: Canto IV +0
- Probeta C: Canto I +1.000
- Probeta D: Canto IV +1.000

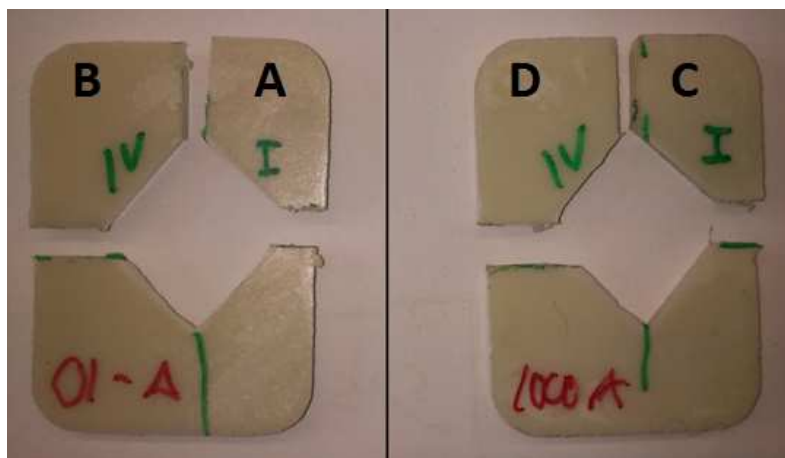


Figura 61. Muestras cortadas para obtención de probetas A, B, C y D

Para la medida de las superficies de las réplicas metalográficas en el perfilómetro óptico y la observación de las fibras de vidrio en el microscopio electrónico, estas tuvieron que ser metalizadas, ya que al ser de color blanco, el haz de luz del perfilómetro no reflejaba sobre la superficie y no se podían obtener resultados. Para ello se procedió al metalizado de las muestras mediante el aparato destinado para este fin situado en el SAIT.

Determinación de rugosidad en probetas y placas (tras inyectar)

El siguiente paso consiste en volver a medir la nueva rugosidad de las placas a fin de cuantificar su desgaste. También se determinará la rugosidad de las cuatro probetas obtenidas mediante el perfilómetro óptico, para del mismo modo comparar la primera muestra con la número mil.

Como ya se hizo antes de comenzar el proceso de inyección, se vuelven a realizar cuatro lecturas de rugosidades sobre el acero, dos para cada una de las placas del molde:

- Placa A: Cara I y Cara IV
- Placa B: Cara I y Cara IV

Para las cuatro probetas, medimos la rugosidad en el centro de los cantos con una resolución de $2.5 \times 2.5 \mu\text{m}$.

Los valores de rugosidad Ra (N-S) sometidos a estudio serán los tomados en la dirección que recorre la pieza en sentido longitudinal.

Imágenes del microscopio electrónico de barrido

Las micrografías electrónicas de barrido se obtuvieron mediante un microscopio Hitachi S3500N, tanto para las placas de acero del molde como de las cuatro probetas de G10.

Estas imágenes servirán para observar el desgaste producido y la orientación y distribución de las fibras en las probetas, los cuales discutiremos en el capítulo siguiente.

Análisis de los resultados y conclusiones

Una vez recopilados todos los datos e imágenes obtenidos en el método experimental se procede a su análisis.

A partir de las medidas de rugosidad obtenidas, topografía superficial y microscopía electrónica de barrido, se discute la influencia de la orientación de la fibra con respecto al flujo de inyección y la evolución del daño superficial de los materiales con la geometría, el flujo de inyección y el número de muestras inyectadas. Estos datos, imágenes y resultados serán mostrados y discutidos en el capítulo siguiente.

CAPÍTULO III. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

1. Introducción
2. Desgaste del molde de acero
3. Rugosidad superficial en las probetas
4. Orientación de las fibras en las muestras

1. Introducción

En el proceso de inyección de polímeros reforzados por fibra de vidrio, la vida útil del molde se reduce debido al daño superficial y desgaste producidos por la incidencia de las fibras sobre la pared del molde. Este deterioro reduce a su vez la calidad del acabado de las piezas inyectadas.

Se ha determinado la variación de la rugosidad superficial de las paredes del molde y de las piezas inyectadas de Polibutilen Tereftalato (PBT) reforzado con un 50% de fibra de vidrio (Ultradur B4300 G10) en función del número de operaciones de inyección.

A partir de medidas de rugosidad, topografía superficial y microscopía electrónica de barrido, discutimos la influencia de la orientación de la fibra con respecto al flujo de inyección y la evolución del daño superficial de los materiales con la geometría, el flujo de inyección y el número de piezas inyectadas.

Los valores de rugosidad y los perfiles tridimensionales de la topografía superficial antes y después del proceso de inyección son ofrecidos por el software asociado al perfilómetro óptico Talysurf CLI, según la norma ISO 4287. En las medidas realizadas con el perfilómetro óptico los valores de rugosidad R_a y R_t obtenidos, son calculados mediante todas las longitudes de muestra que el perfilómetro realiza según los parámetros a los que se ajustó, usando un filtrado de micro rugosidad con una relación de 2,5 o 5 μm , con filtro 2CR a 25mm y hace una selección de 16 perfiles entre los 501 que realiza.

En las tablas que se muestran a continuación se ofrecen los valores de rugosidades medias con su desviación típica asociada en μm , siendo:

- R_a : Media aritmética de las diferencias con la media
- R_t : Altura total del perfil en la longitud de evaluación
- S_a : Altura media aritmética
- S_q : Altura media cuadrática de la superficie

Los valores de rugosidad R_a (N-S) sometidos a estudio serán los tomados en la dirección que recorre la pieza en sentido longitudinal con su correspondiente desviación típica.

Las micrografías electrónicas de barrido de las placas de acero y de las probetas de Ultradur G10 se obtuvieron mediante el microscopio Hitachi S3500N.

2. Desgaste del molde de acero

Mostramos a continuación los valores de rugosidad y perfiles tridimensionales de la topografía superficial para el acero 1.2343, así como las micrografías electrónicas de barrido obtenidas para las caras de las dos placas del molde y discutiremos los resultados obtenidos.

2.1. Placa A

Comenzamos mostrando los resultados obtenidos con el perfilómetro óptico para la placa A, tanto antes como después del proceso de inyección, obteniendo valores de amplitud, altura y rugosidad para las caras I y IV.

La tabla 22 recopila estos valores, todos expresados en μm .

Tabla 22. Parámetros de amplitud-altura y perfil de rugosidad (μm) placa A

	Antes del proceso de inyección		Tras 1.000 muestras inyectadas	
	Cara I	Cara IV	Cara I	Cara IV
Ra				
E-O	0,0433 [0,0135]	0,0508 [0,0274]	0,428 [0,041]	0,179 [0,0176]
N-S	0,0322 [0,0065]	0,0445 [0,0107]	0,315 [0,0125]	0,213 [0,0247]
Rt				
E-O	0,623 [0,682]	0,757 [0,626]	3,05 [0,442]	1,64 [0,333]
N-S	1,47 [1,4]	1,73 [0,73]	3,34 [0,47]	2,45 [0,585]
Sa	1,83	1,04	0,578	3,4
Sq	2,41	1,24	0,743	4,51

Los valores mostrados entre corchetes corresponden a la desviación típica asociada a cada magnitud.

Centrándonos primeramente en los valores de rugosidad Ra (N-S), los cuales han sido tomados en la dirección longitudinal de la pieza, observamos en la Cara I como la rugosidad aumenta tras 1.000 inyecciones de Ultradur G10 desde un valor inicial de $0,032 \mu\text{m}$ hasta $0,315 \mu\text{m}$. Luego la rugosidad en esta zona más cercana a la puerta de alimentación de inyección aumenta en un orden de magnitud.

Para esta misma cara, en los valores de rugosidad medidos en dirección transversal (E-O) el comportamiento es prácticamente idéntico variando desde un valor de $0,043 \mu\text{m}$ hasta $0,428 \mu\text{m}$.

En la Cara IV observamos el mismo efecto pues para la rugosidad medida en dirección longitudinal, la rugosidad varía desde $0,045 \mu\text{m}$ a $0,213 \mu\text{m}$, aumentando aproximadamente 5 veces.

Los valores de rugosidad medidos para la Cara IV en dirección transversal aumentan desde $0,051 \mu\text{m}$ a $0,179 \mu\text{m}$, variando una proporción similar al sentido perpendicular.

Este comportamiento de aumento de la rugosidad en las Caras I y IV, podemos apreciarlo de manera más visual en el gráfico de columnas siguiente.

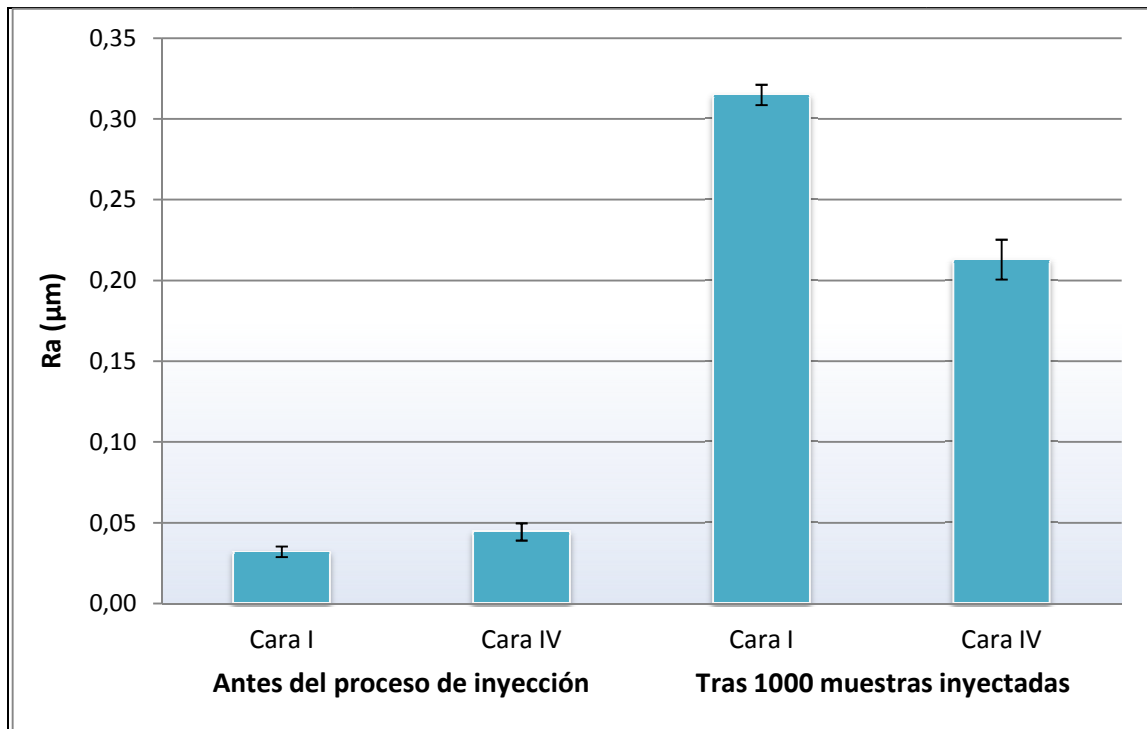


Figura 62. Gráfico variación de la rugosidad placa A

Se comprueba que se produce un mayor incremento de la rugosidad superficial en las zonas más cercanas a la puerta de alimentación de inyección (Cara I) que en las más alejadas (Cara IV).

A continuación se muestra la imagen correspondiente a la microperfilometría de la Cara I antes del proceso de inyección. Esta cara es muy significativa pues es en la que se produce un mayor aumento de la rugosidad superficial:

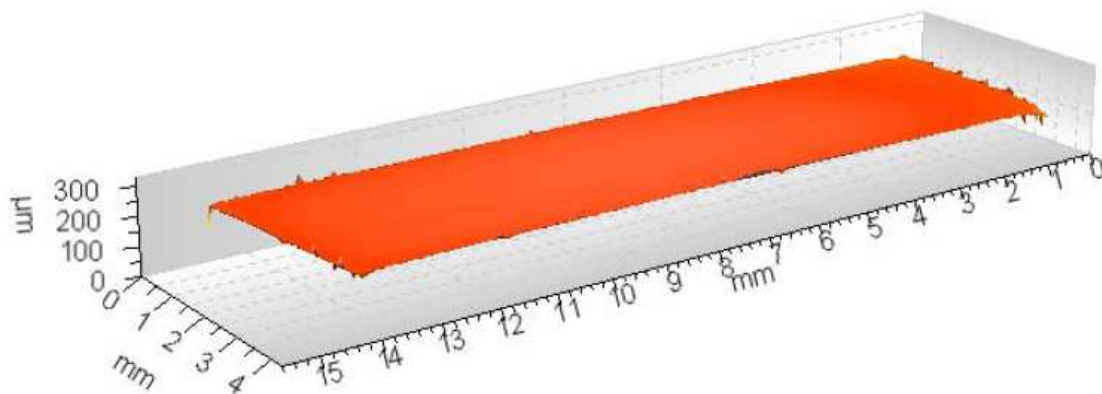


Figura 63. Topografía de la Cara I de la placa A antes de inyectar

La zona de color rojo corresponde a la superficie menos alterada de la placa, y apenas se pueden apreciar picos y valles de diferente color correspondientes a zonas de altos valores de rugosidad.

La siguiente microperfilometría corresponde a esta misma cara pero después del proceso de inyección. Se puede ver el efecto producido por la fibra de vidrio al incidir sobre el acero de forma visual. El aumento de rugosidad en esta cara de la placa se puede diferenciar gracias a los distintos colores, donde la zona de color rojo corresponde a la superficie menos alterada de la placa y las zonas de picos de color amarillo-verde-azul corresponden a las zonas más profundas sometidas a un mayor desgaste.

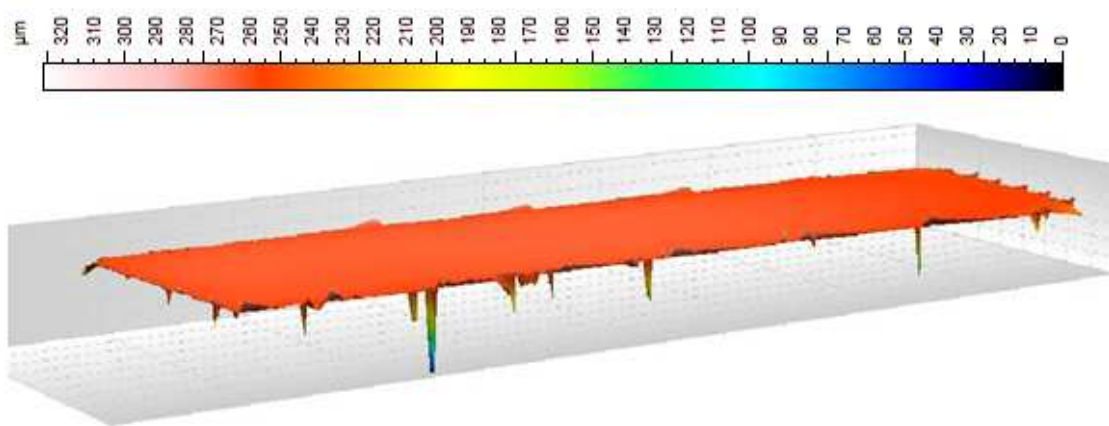


Figura 64. Topografía de la Cara I de la placa A después de inyectar

A continuación se muestran las micrográficas de las caras I y IV de la placa A tras el proceso de inyección, obtenidas mediante el microscopio electrónico de barrido.

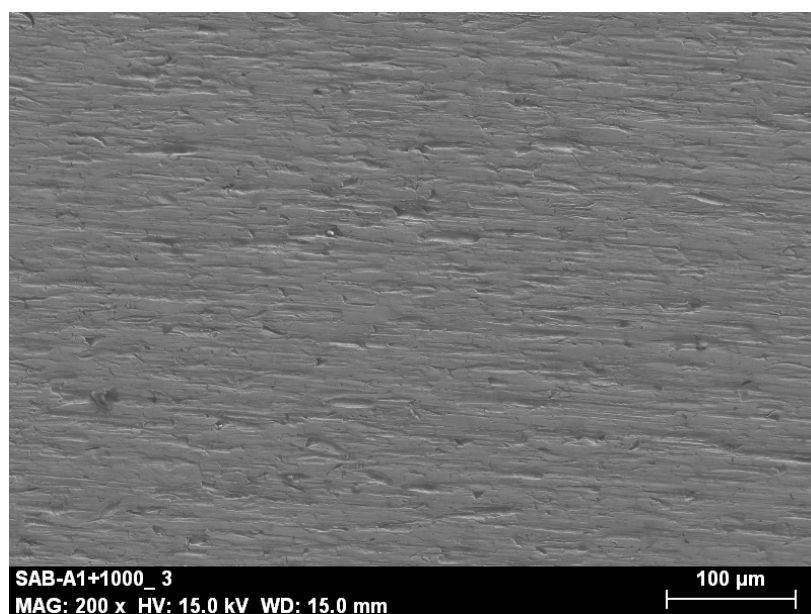


Figura 65. Micrografía SEM de la placa A (cara I; vista frontal)

Para esta Cara I se puede apreciar un desgaste uniforme y similar, siguiendo una dirección longitudinal bastante acentuada. Este sentido puede estar influenciado por el sentido de incidencia de las fibras de vidrio del material, como comentaremos en el último apartado de este capítulo.

Podemos observar como la fibra ha efectuado una acción abrasiva sobre la superficie del acero, con arranque de material y con una clara orientación en la dirección del flujo.

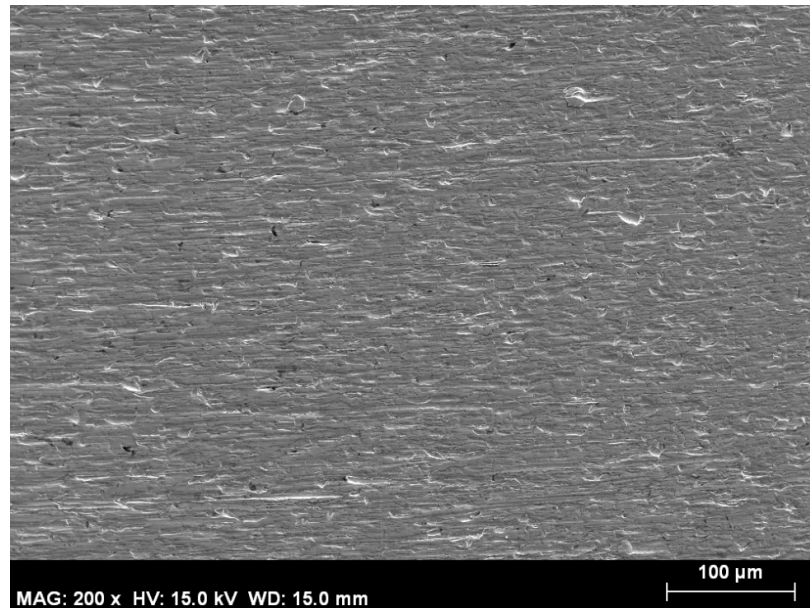


Figura 66. Micrografía SEM de la placa A (cara IV; vista frontal)

En esta micrografía de la Cara IV, el sentido del desgaste y abrasión no se aprecia tan acentuadamente como en la Cara I, donde se apreciaba un desgaste mucho más uniforme en el sentido de inyección del flujo.

2.2. Placa B

Pasamos a comentar los valores obtenidos para la otra placa del molde de acero, colocada en posición simétrica a la Placa A con respecto a la puerta de alimentación del flujo de inyección.

Al igual que en la placa A, la Cara I está en posición más cercana a la puerta de alimentación, pero en esta placa, tanto la Cara I como la IV están en la posición inferior del molde (figura 58).

Mostramos primeramente los valores obtenidos en el perfilómetro óptico. Estos valores son la rugosidad media aritmética, la altura total del perfil, la altura media aritmética y la altura media cuadrática de la superficie, expresados en μm . Para las caras I y IV antes y después del ciclo de inyección son los siguientes:

Tabla 23. Parámetros de amplitud-altura y perfil de rugosidad (μm) placa B

		Antes del proceso de inyección		Tras 1.000 muestras inyectadas	
		Cara I	Cara IV	Cara I	Cara IV
Ra	E-O	0,0578 [0,0087]	0,0522 [0,0069]	0,359 [0,0268]	0,232 [0,0199]
	N-S	0,0342 [0,0038]	0,0354 [0,0037]	0,286 [0,0206]	0,271 [0,0165]
Rt	E-O	0,383 [0,0879]	0,462 [0,17]	2,95 [0,483]	1,97 [0,333]
	N-S	0,336 [0,164]	0,528 [0,484]	3,1 [0,585]	3,07 [0,478]
Sa		0,518	0,866	1,14	1,54
Sq		0,654	1,02	1,42	1,91

Centrándonos en los valores de rugosidad medidos en las caras de las placas en sentido longitudinal (N-S) y representando dichos valores en un gráfico de barras, obtenemos el siguiente comportamiento en las Caras I y IV:

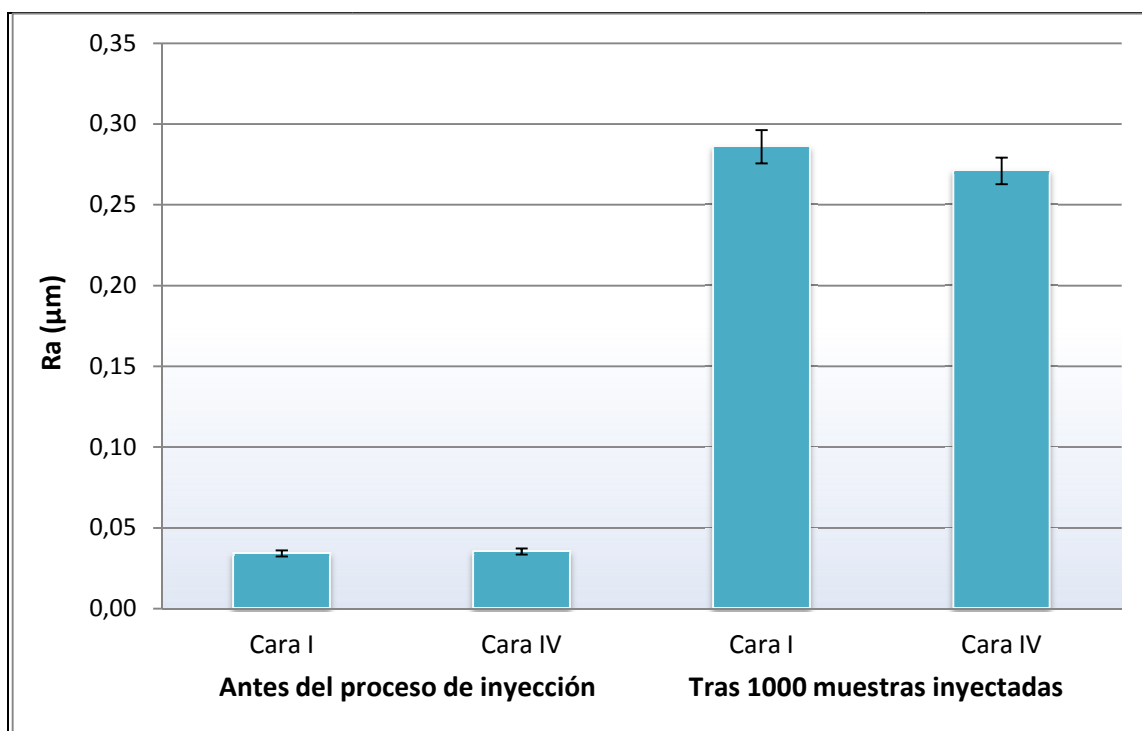


Figura 67. Gráfico variación de la rugosidad placa B

Para la Cara I vemos como la rugosidad aumenta tras las 1.000 inyecciones desde un valor inicial de $0,034 \mu\text{m}$ hasta $0,286 \mu\text{m}$, aumentando en casi un orden de magnitud.

Para la Cara IV observamos un efecto similar, pues la rugosidad varía desde $0,035 \mu\text{m}$ a $0,271 \mu\text{m}$, aumentándose unas 8 veces.

Para esta placa, vemos como partiendo de un valor de rugosidad prácticamente idéntico ($0,0342$ frente a $0,0354 \mu\text{m}$), el valor de la rugosidad para la Cara I se hace aproximadamente un 6% mayor que en la Cara IV ($0,286$ frente a $0,271 \mu\text{m}$).

En las micrográficas del microscopio electrónico de barrido de las caras de esta placa tras el proceso de inyección se observa una marcada rugosidad, resultado del daño superficial y desgaste producidos por la incidencia de las fibras sobre las caras de las placas.

La siguiente figura corresponde a la micrografía del microscopio electrónico de la Cara I de la placa de acero B. Esta es la cara donde el flujo incide de forma más directa y se produce un mayor aumento de la rugosidad superficial ($0,286 \mu\text{m}$).

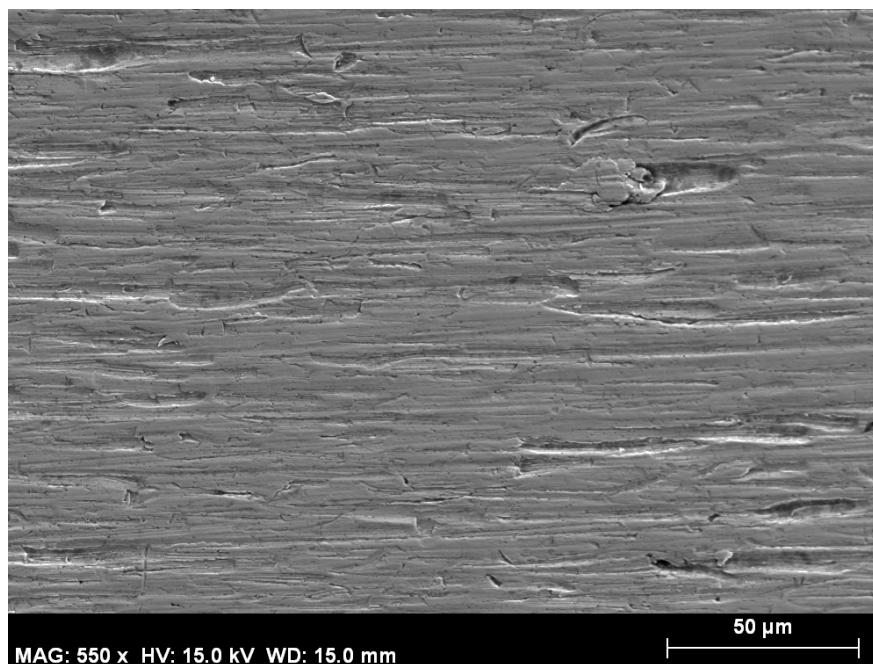


Figura 68. Micrografía SEM de la placa B (cara I; vista frontal)

En la figura 68 se aprecia nuevamente la acción abrasiva de las fibras de vidrio sobre el acero.

Se observa un arranque de material en la dirección longitudinal que sigue el flujo, distinguiéndose algunas zonas en las que este arranque y desplazamiento de material es especialmente acentuado y se han formado ligeros surcos en la superficie del acero.

2.3. Comparación de placas y caras

A continuación comparamos los valores de rugosidades medidos en sentido longitudinal obtenidos para las Caras I y IV de las dos placas del molde.

Como hemos visto, ambas placas tienen un comportamiento similar. Las rugosidades de partida para las Caras I y IV son muy similares y tras finalizar el proceso de inyección, se aprecia un fuerte incremento porcentual en los valores de rugosidad.

Tabla 24. Rugosidad (μm) placas A y B

Ra (μm)	Placa A	
	Antes del proceso de inyección	
	Cara I	Cara IV
	0,032 [0,0065]	0,045 [0,0107]
	Tras 1.000 piezas inyectadas	
	Cara I	Cara IV
	0,315 [0,0125]	0,213 [0,0247]
	Placa B	
	Antes del proceso de inyección	
	Cara I	Cara IV
	0,034 [0,0038]	0,035 [0,0037]
	Tras 1.000 piezas inyectadas	
	Cara I	Cara IV
	0,286 [0,0206]	0,271 [0,0165]

Para ambas placas, se produce un mayor aumento de la rugosidad superficial en las zonas más cercanas a la puerta de alimentación de la inyección (Cara I), debiéndose esto principalmente al sentido de la orientación e incidencia de las fibras de vidrio sobre el acero como se muestra en el último apartado.

3. Rugosidad superficial en las probetas

El desgaste sufrido por las placas como consecuencia de las múltiples inyecciones, tiene su efecto también en las muestras producidas.

Conforme aumenta el número de muestras inyectadas visualmente se puede apreciar como las muestras numero 1.000 tienen un menor brillo superficial que las que se produjeron tras las primeras operaciones de inyección.

La siguiente figura representa la micrografía de las cuatro probetas de Ultradur G10 conjuntas.

Las cuatro probetas pertenecen a la parte A de las muestras obtenidas. La Probeta A corresponde al canto I de la primera muestra obtenida; la probeta B al canto IV de esa primera muestra; las probetas B y C corresponden a la muestra número 1.000, siendo la B el canto I y la D el canto IV (figura 61).

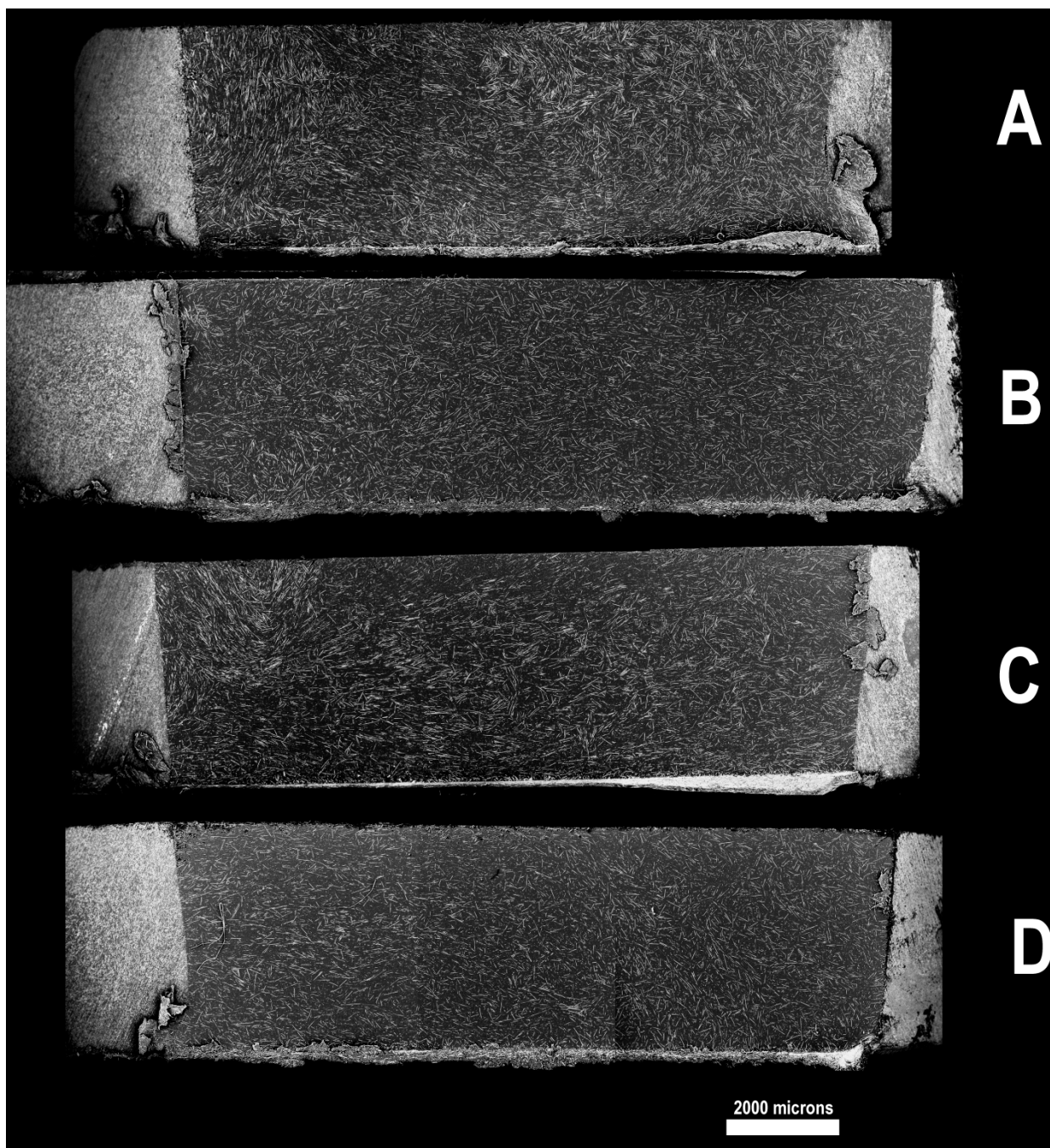


Figura 69. Micrografía SEM de las cuatro probetas de Ultradur G10

Al igual que con las placas de acero del molde de inyección las probetas también fueron medidas en el perfilómetro óptico. La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos para las cuatro probetas de Ultradur G10.

Los valores de rugosidad media aritmética, altura total del perfil, altura media aritmética y altura media cuadrática de la superficie referentes a las Probetas A, B, C y D (expresados en μm) vienen recopilados en la siguiente tabla.

Tabla 25. Rugosidad (μm) probetas Ultradur G10 (50% fibra de vidrio)

	Probeta A	Probeta B	Probeta C	Probeta D
	Muestra 1 de Ultradur G10		Muestra 1.000 de Ultradur G10	
	Canto I	Canto IV	Canto I	Canto IV
Ra				
E-O	0,629 [0,125]	0,368 [0,0335]	0,41 [0,038]	0,387 [0,0375]
N-S	1,11 [0,201]	0,364 [0,0215]	0,419 [0,0207]	0,562 [0,032]
Rt				
E-O	6,99 [3,03]	4,24 [1,1]	4,19 [1,69]	3,66 [0,859]
N-S	12,9 [5,11]	5,11 [1,38]	5,19 [2,21]	18 [0,848]
Sa	2,66	2,84	1,51	5,05
Sq	3,24	3,43	1,97	6,1

Se observa como en las piezas de PBT reforzado con un 50% de fibra de vidrio obtenidas también se produce una variación de rugosidad en la superficie de contacto con el molde, pero estas variaciones de rugosidad no muestran una relación de incremento lineal tal y como sucede con el acero.

Para el Canto I, fijándonos en los valores de rugosidad recorriendo la pieza de manera longitudinal, la rugosidad media pasa de 1,11 μm antes del proceso de inyección hasta un valor de 0,419, disminuyendo en un 62%, luego el efecto que obtenemos es un efecto de pulido.

Por el contrario, para el Canto IV si apreciamos un ligero aumento de rugosidad, pasando esta de un valor inicial de 0,364 μm hasta una rugosidad superficial de 0,562 μm en la muestra número 1.000, aumentando un 54% tras el proceso de inyección. En esta zona central de los cantos, el desgaste tras el proceso de inyección apenas es palpable.

4. Orientación de las fibras en las muestras

Uno de los aspectos más importantes en el moldeo por inyección es la orientación del polímero al entrar en la cavidad del molde y después, cuando solidifica.

Esta orientación podría llegar a ser un problema, por lo que se debería minimizarla y un enfriamiento rápido de las piezas moldeadas conlleva una congelación de las distribuciones orientadas.

Si la orientación es marcada las tensiones podrían provocar la distorsión de las piezas moldeadas, ya sea con lentitud si los esfuerzos se alivian espontáneamente, o con rapidez si el material se somete a temperaturas de servicio elevadas.

Al encontrarse una mayor alineación en una dirección que en la otra, las propiedades en la pieza son diferentes en las dos direcciones, es decir, el producto presentará propiedades anisotrópicas. El material será más fuerte (presentará mayor resistencia) en la dirección de flujo.

A continuación observaremos mediante micrografías del microscopio electrónico estas posibles diferentes direcciones de orientación y discutiremos la influencia de esta orientación de la fibra sobre el aumento de rugosidad en las paredes del molde de acero.

La siguiente figura nos servirá de ayuda para comprender la nomenclatura utilizada en este apartado. Esta figura representa la parte B de la muestra inyectada número 1.000 de Ultradur G10. La flecha de la parte superior indica el sentido de inyección desde el que el material fundido entra al molde.

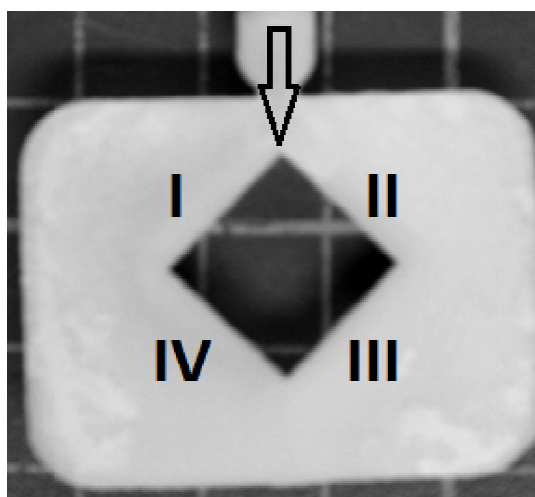


Figura 70. Dirección de inyección del flujo en la muestra 1.000-B de Ultradur G10

Para esta parte B de las muestras, las caras de incidencia directa del flujo sobre las caras de la placa de acero son la I y la II. Comprobaremos como la orientación de la fibra varía en estas caras con respecto a las caras III y IV.

La siguiente imagen representa la vista superior de la composición de micrografías SEM de la muestra 1.000-B.

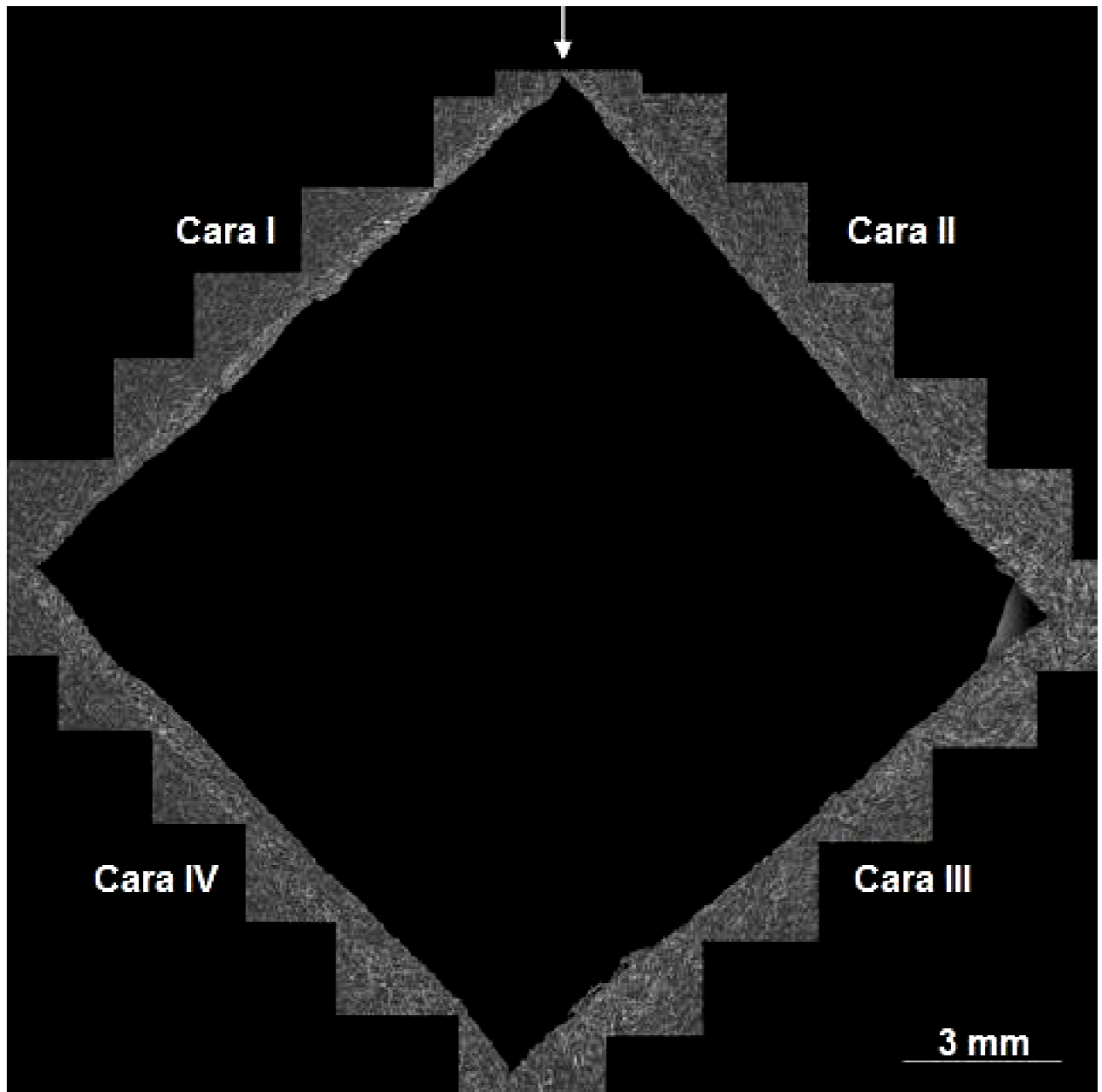


Figura 71. Vista superior de micrografías SEM de los cantos de la muestra 1.000-B

Cuando el material fundido entra al molde hay poca orientación. Conforme el material se pone en contacto con la pared del molde, se genera una capa de baja orientación. El molde produce un gran efecto en la orientación, pues cuando el polímero fundido es forzado a entrar en él y hace contacto con las paredes, se solidifica.

A continuación se muestran algunas de las imágenes obtenidas en el microscopio electrónico de las vistas superiores de las caras II y III para observar el sentido de incidencia de las fibras de vidrio y ver qué influencia tienen sobre el aumento de la rugosidad superficial.

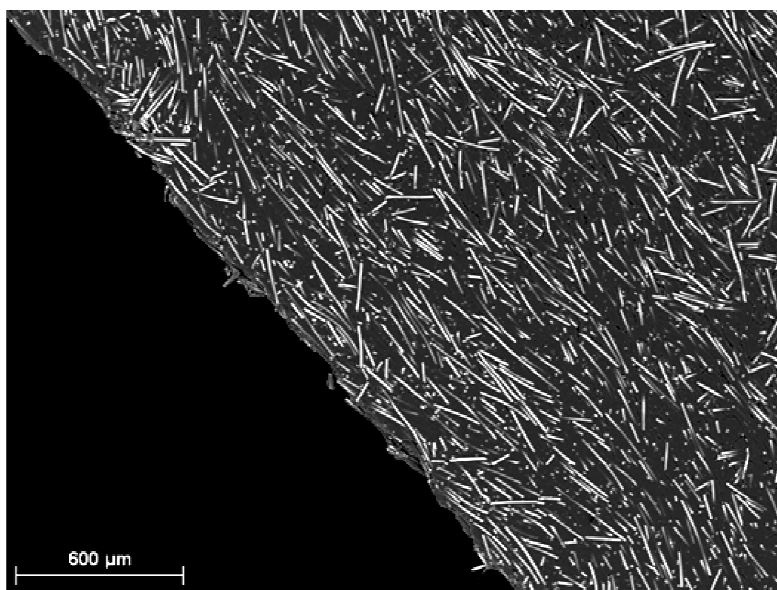


Figura 72. Micrografía SEM de la muestra 1.000-B (cara II; vista superior)

La figura 72 pertenece a la cara II, zona de incidencia directa del fluido sobre la pared de la placa de acero. Podemos apreciar que existe un marcado efecto de la orientación de las fibras en función del flujo de inyección, pues se produce un alineamiento paralelo a la dirección del flujo y las fibras se deslizan paralelamente a la superficie.

Este efecto altamente orientado del flujo produce un mecanismo de desgaste abrasivo y el consiguiente aumentando de la rugosidad del acero tras las 1.000 inyecciones debido a un efecto de pulido.

La siguiente figura muestra una micrografía mirando desde una posición frontal a la cara (probeta A).



Figura 73. Micrografía SEM de la probeta A de Ultradur G10 (cara I; vista frontal)

Se aprecia como al ser la orientación de la fibra paralela en la región próxima a la entrada del flujo de inyección, en amplias regiones de esta zona lateral se ven las fibras en toda su amplitud.

Como hemos comentado, estas fibras poseen una orientación paralela a la dirección de la cara del molde de acero, pero comprobamos como dentro de esta dirección, desde esta plano paralelo a la cara de la placa de acero, las fibras no muestran una orientación preferencial, pues se orientan según diversos sentidos en el canto de la muestra.

La siguiente micrografía corresponde al mapa elemental de Silicio, en la cual quedan reflejadas las fibras de vidrio distribuidas por el material. Estas fibras se muestran en un marcado color amarillo.

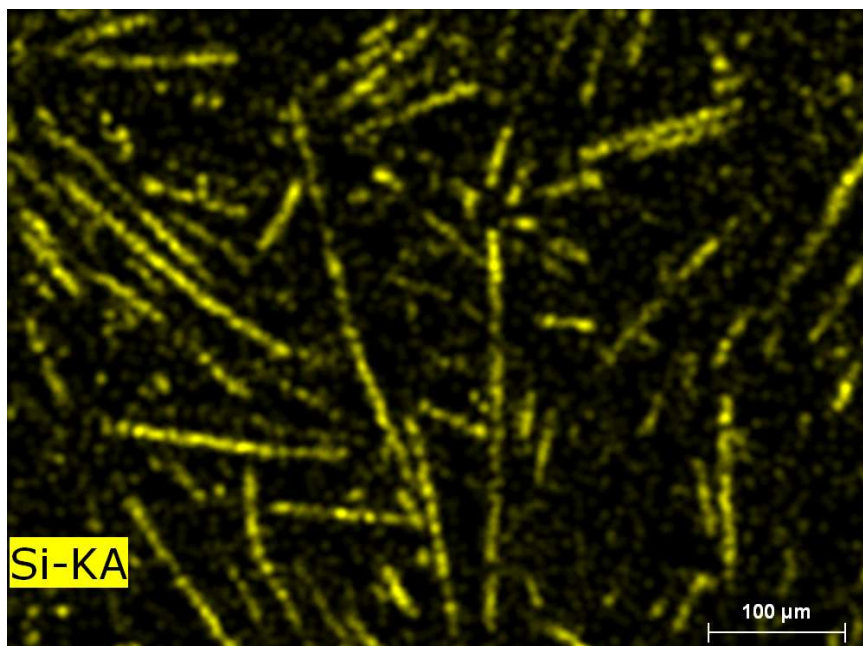


Figura 74. Mapa elemental de Si de la probeta A de Ultradur G10

En esta micrografía se observa el mismo efecto que hemos comentado anteriormente, pues se aprecian las fibras de vidrio en toda su longitud distribuidas de forma aleatoria por la superficie del material.

Tras comprobar sentido paralelo que toman las fibras en las caras cercanas a la puerta de inyección de incidencia directa, continuamos con el ángulo formado por los lados II y III. Este ángulo se observa en la siguiente micrografía y se puede ver la distinta orientación de la fibra, pudiendo apreciar el recorrido tomado por el fluido durante el llenado del molde.

En la figura se aprecia como en el ángulo formado por las Caras II y III, en la zona más cercana a las paredes del acero la fibra deja de tener un comportamiento uniformemente paralelo a la pared, para pasar a un comportamiento mucho más aleatorio, con una distribución más desigual.

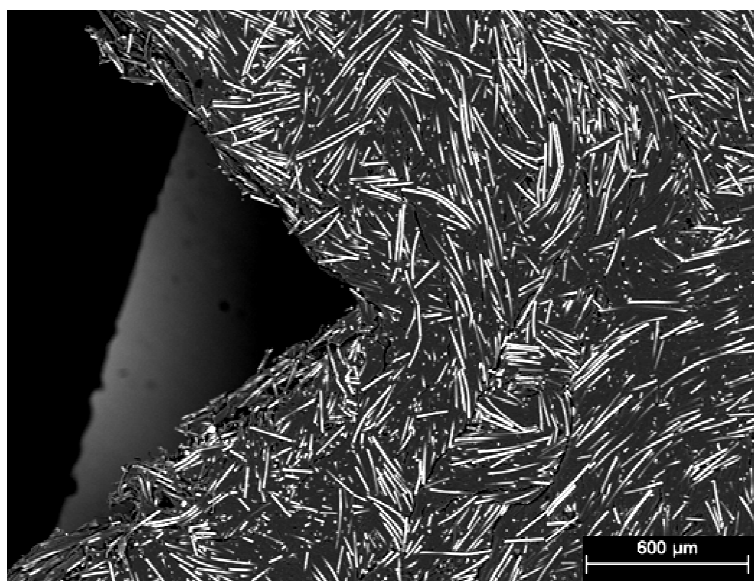


Figura 75. Micrografía SEM de la muestra 1.000-B de Ultradur G10 (caras II-III; vista superior)

La siguiente figura corresponde a la micrografía de la cara III de la muestra 1.000-B de Ultradur G10, donde se aprecia la distribución que toma la fibra de vidrio dentro del material.

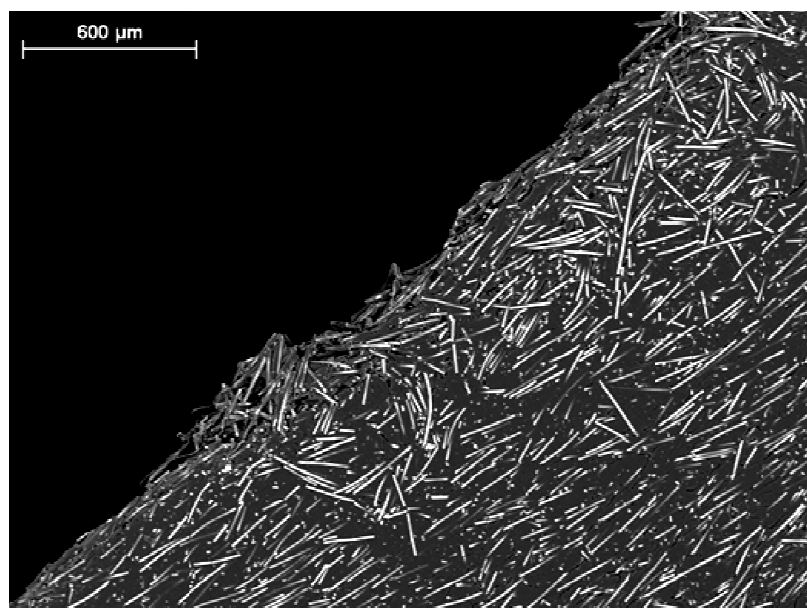


Figura 76. Micrografía SEM de la muestra 1.000-B (cara III; vista superior)

Como puede apreciarse en esta micrografía, la orientación preferencial de la fibra en este caso es mucho más aleatoria, con incidencias paralelas y perpendiculares a la superficie del acero. Observamos como en las zonas donde no se presenta una incidencia tienen un bajo grado de orientación.

La siguiente figura corresponde a la micrografía de la Probeta B, la cual corresponde a la Cara IV de la primera muestra inyectada.



Figura 77. Micrografía SEM de la probeta B de Ultradur G10 (cara IV; vista frontal)

Se aprecia un destacable cambio de densidad de la fibra y la orientación en esta Cara IV con respecto a la Cara I. Esta disminución apreciable de fibra es debido a la geometría de la placa y a la distancia a la puerta de inyección.

En esta cara donde el flujo inyectado no incide directamente sobre las paredes del molde, no se muestra una orientación preferencial de las fibras de vidrio, puesto que se aprecia un claro desorden de estas con respecto al flujo del polímero.

Al ser la incidencia de las fibras aleatoria, no solo se observan las fibras en su amplitud, sino que podemos observar amplias regiones de la zona lateral donde aparecen los extremos de las fibras como se observa señalado en la siguiente micrografía.

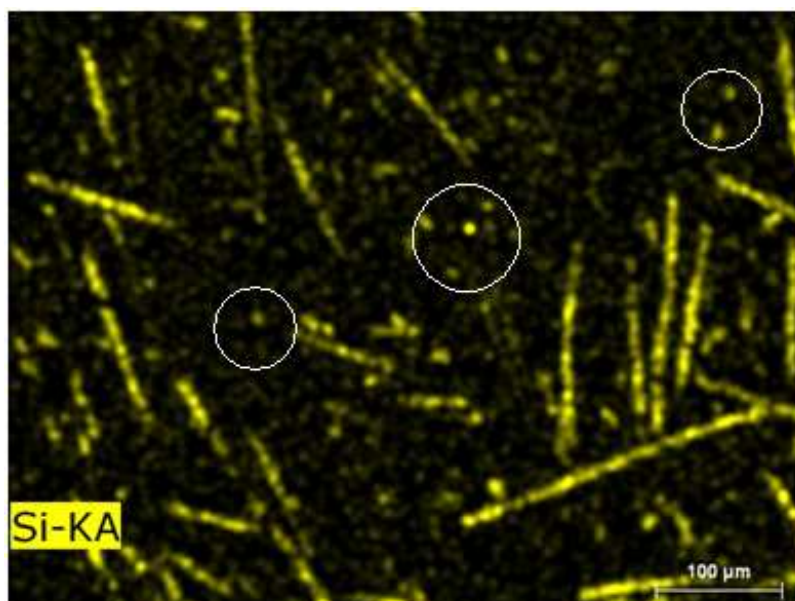


Figura 78. Mapa elemental de Si de la probeta B de Ultradur G10

En la figura 79, micrografía SEM más ampliada en detalle, se observan con una buena resolución las fibras de vidrio.

Estas fibras de vidrio organizadas dentro del Ultradur G10 están dispuestas en todas las direcciones y poseen un diámetro aproximado de 10 μm .

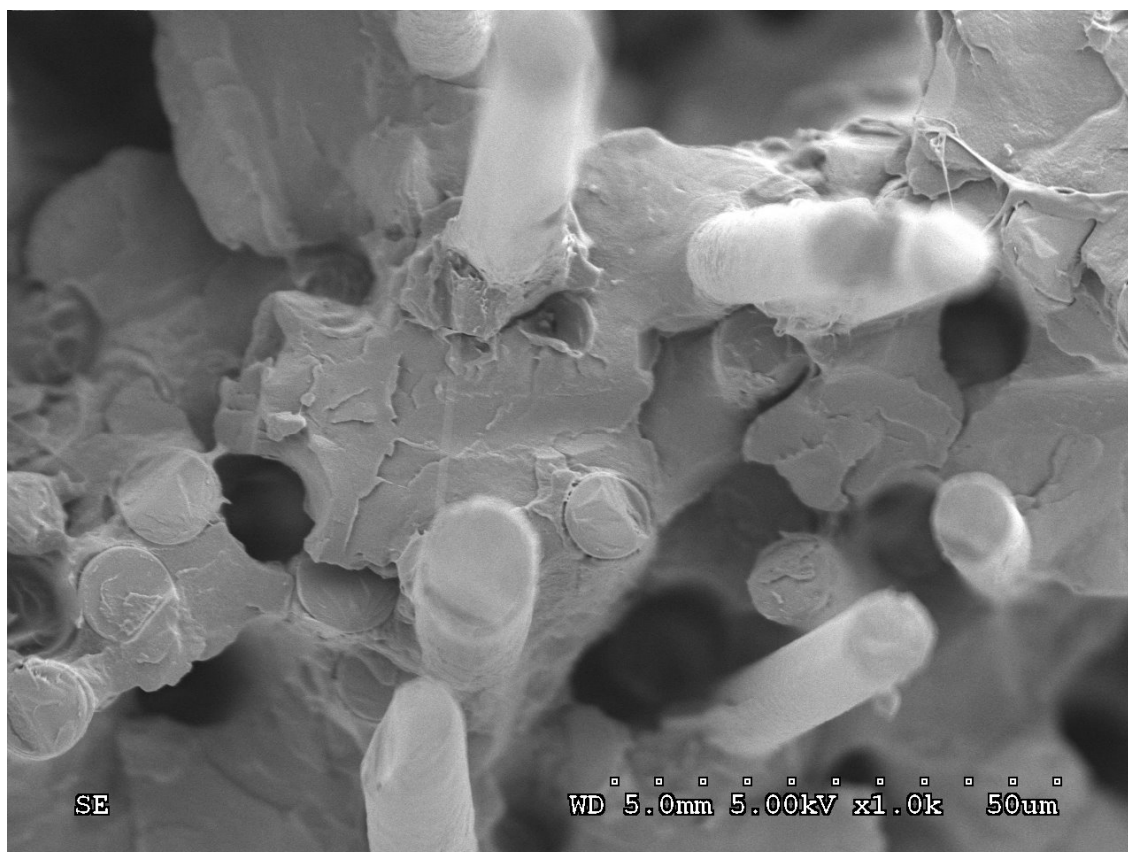


Figura 79. Fibras de vidrio dentro del Ultradur G10

CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES

Se han determinado los daños superficiales tanto en la pared del molde de acero normalizado 1.2343 (23 HRC) como en el material inyectado después de 1.000 operaciones de moldeo por inyección en la inyectora 250H55 mini VP. El material inyectado ha sido Polibutilen Teraftalato (PBT) reforzado con un 50% de fibra de vidrio (Ultradur B4300 G10; BASF).

Los valores de rugosidad y los perfiles tridimensionales de la topografía superficial después de las operaciones de inyección se han obtenido mediante un perfilómetro óptico Talysurf CLI, según la norma ISO 4287. Las micrografías electrónicas de barrido se obtuvieron mediante un microscopio Hitachi S3500N.

A partir de medidas de rugosidad, topografía superficial y microscopía electrónica de barrido, se ha discutido la influencia de la orientación de la fibra con respecto al flujo de inyección y la evolución del daño superficial de los materiales con la geometría, el flujo de inyección y el número de piezas inyectadas.

Para las paredes del acero del molde, existe un fuerte incremento porcentual en los valores de la rugosidad tras las 1.000 inyecciones realizadas. Este incremento es mayor en las zonas más cercanas a la puerta de alimentación, ya que partiendo de valores de rugosidad muy similares, los valores finales en las caras donde el flujo incide de forma más directa aumentan en mayor grado.

Sobre la superficie del acero se produce un desgaste consecuencia del rozamiento y fricción en seco entre el material inyectado y el molde, lo cual se traduce en una degradación superficial de las partes activas.

Observando la variación de la rugosidad superficial en las paredes del molde de acero, antes y después del proceso de inyección, se comprueba que se produce un mayor incremento de la rugosidad en las zonas más cercanas a la puerta de alimentación de la inyección. En esta zona el valor de la rugosidad tras las 1.000 inyecciones aumenta en un orden de magnitud.

En las caras donde el flujo inyectado no incide directamente se produce un incremento de rugosidad destacable pero algo inferior al anterior, aumentando aproximadamente entre 5 y 8 veces.

Se ha podido observar mediante micrográficas y la técnica de mapeo elemental de Silicio en el SEM, la orientación y distribución de las fibras de vidrio, observado cómo se distribuyen en sentidos transversal y longitudinal.

Conforme el material se pone en contacto con la pared del molde, se genera una capa de baja orientación. El molde produce un gran efecto en la orientación, pues cuando el polímero fundido es forzado a entrar en él y hace contacto con las paredes, se solidifica.

Existe un marcado efecto de la orientación de las fibras en función del flujo de inyección en las caras de las placas del molde donde este incide directamente. En esta zona se produce un alineamiento paralelo a la dirección del flujo y las fibras se deslizan paralelamente a la superficie.

En las caras donde el flujo inyectado no incide directamente no se muestra una orientación preferencial de las fibras de vidrio, pues hay un claro desorden de las fibras con respecto al flujo del polímero. En consecuencia, el aumento de la rugosidad superficial en esta zona es debido a la combinación del efecto de pulido con el impacto de las fibras contra la pared del molde de acero.

La fibra de vidrio efectúa una acción abrasiva con arranque de material, formándose ligeros surcos en zonas puntuales de la superficie del acero debido al efecto pulido.

El desgaste sufrido sobre la superficie del acero como consecuencia de las múltiples inyecciones también tiene su efecto en las muestras producidas. Las piezas obtenidas de PBT reforzado con un 50% de fibra de vidrio muestran una variación de rugosidad en la superficie de contacto con el molde, pero estas variaciones de rugosidad no muestran una relación lineal como sucede en el acero.

Para los cantos de las piezas más cercanos a la puerta de alimentación, comparando los valores de rugosidad superficial de la primera muestra y de la número 1.000, la rugosidad media disminuye obteniéndose un efecto de pulido. Para los cantos más alejados, en la zona central de estos el desgaste tras el proceso de inyección apenas es palpable.

En conclusión, la vida útil del molde se reduce debido al daño superficial y desgaste producidos por la incidencia de las fibras sobre la pared del molde y por consiguiente se reduce a su vez la calidad del acabado de las piezas inyectadas.

CAPÍTULO V. BIBLIOGRAFÍA

- *“Engineered materials handbook Volume 2: Engineering plastics”*, ASM Intenacional (1998)
- *“Polímeros”*, Javier Areizaga (2002)
- *“Plastics: Product Design and Process Engineering”*, Harold Belofsky (1995)
- *“Materiales plásticos, propiedades y aplicaciones”*. Rubin (2001)
- *“Procesamiento de plásticos”*, Morton- Jones (2003)
- *“Inyección de termoplásticos”*, Jose Luis Arrazo Urraca (2000)
- *“Injection Molding”*, Gerd Pötsch, Walter Michaeli. Hanser (2008)
- *“Ingeniería de moldes para plástico”*, John Harry (1982)
- *“Materiales compuestos I”*, Antonio Miravete (2009)
- *“Surface damage of mold steels and its influence on surface roughness of injection molded plastic parts”*, I. Martínez-Mateo, F. J. Carrión-Vilches, J. Sanes, M.D. Bermúdez (2011)
- *“Estudio de la rugosidad superficial de piezas inyectadas de PBT reforzado con fibra de vidrio y del acero del molde en función de la orientación de la fibra”*, F. J. Carrión-Vilches, I. Martínez-Mateo, María-Dolores Bermúdez (2012)